OKTOBER 2005 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT

> Übergewicht: Ist Fettleibigkeit eine Epidemie?

> Künstliche Netzhaut

> Hepatitis-C-Virus im Labor

> Konstante Naturkonstanten?

> ESSAY: Intelligent Design

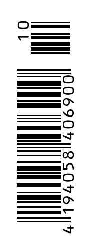
www.spektrum.de

SERIE (TEIL I) DIE WELT IM JAHR 2050

Menschheit am Scheideweg

- Aktionsplan für das 21. Jahrhundert
- Wege aus der Energiekrise
- Leben mit neun Milliarden Menschen

D6179E
13,50 sFr/Luxemburg 8,– €





Reinhard Breuer
Chefredakteur

Entscheiden, solange es geht

Alle Jahrzehnte mag es geboten sein, einen Blick auf die Zukunft des Großen und Ganzen zu werfen. Nachdem wir zuletzt in den Ausgaben 11/1980 und 11/1989 die Situation der Welt analysiert haben, greifen wir jetzt wieder globale Fragen auf, die sich mit der prekären Zukunft der Erde und ihrer Bewohner beschäftigen. (Spektrum-Abonnenten können sich die Ausgabe 11/1989 unter www.spektrum.de/1989 ansehen.)

In diesem Heft starten wir dazu eine dreiteilige Serie. Sie soll die Perspektive auf das Jahr 2050 eröffnen und die wichtigsten Aspekte daraufhin abklopfen, was wir heute tun können – oder unverzüglich tun müssen –, um auch in Jahrzehnten der Menschheit eine lebenswerte Zukunft zu ermöglichen. Die Zeitperspektive ist nicht völlig willkürlich gewählt. Wenn Demografieforscher Recht behalten, ist die Menschheit in der besonderen Situation, kurz vor dem »Bevölkerungsgipfel« von etwa neun Milliarden zu stehen, die Zahl der Menschen scheint sich zu stabilisieren. Das schafft eine neue Situation, die auch neue Fragen aufwirft (S. 36).

Zukunftsprognosen gelten vielen zwar als reine Kaffeesatzleserei. Ihre Erfolgsraten sind nicht sehr beeindruckend, nicht wenige Zukunftsapostel geben einige Jahrzehnte später nur mehr eine klägliche Figur ab. Auch deshalb versucht unsere Serie etwas anderes: Neben Hochrechnungen bis in die Jahrhundertmitte sollen jeweils Handlungsoptionen für die Gegenwart abgeleitet werden. Es geht buchstäblich um »die Menschheit am Scheideweg«: Dabei sollten wir jetzt in zentralen Fragen bestimmte Entscheidungen treffen – später wird es dafür oft zu spät sein. Das haben zwar zahllose Propheten schon immer mal behauptet. Doch viele der hier zitierten Fakten und Analysen erscheinen diesmal hart und unabweislich. Worauf unsere Serie stärker aufmerksam machen will, sind weniger Apokalypsen als vielmehr die verbleibenden Spielräume für das Handeln bei zumeist irreversiblen Prozessen. Das Zeitfenster für viele Entscheidungen schließt sich, so scheint es, rapide. Entsprechend wächst der Zwang sich bald zu entscheiden.

Wir stellen daher ab S. 32 einen »Aktionsplan für das 21. Jahrhundert« vor. Jeder Beitrag berührt einen zentralen Aspekt: Bevölkerungswachstum, Energieverbrauch, Wasserversorgung, neue Krankheiten, Wohlstand, Armut, Artenvielfalt. Mich hat verblüfft, wie die Autoren statt großer, utopischer Schritte durchweg viele kleinere und machbare Aktionen identifizieren. Armory B. Lovins etwa war schon immer kühn beim Entwurf intelligenter Energiesysteme (S. 44). In den Folgen II und III präsentieren Forscher Konzepte unter anderem für ein verändertes Umwelt- und Gesundheitssystem. Sie skizzieren keine Zwangsmaßnahmen, sondern Anreize für eine zwar gefährdete, aber rettbare Zukunft.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

PS: Erstmals haben wir Varianten für das Cover dieser Ausgabe im Internet zur Wahl gestellt. Unter www.spektrum.de/titelwahl beteiligten sich 1000 Personen, links zwei der Verlierer.

OKTOBER 2005

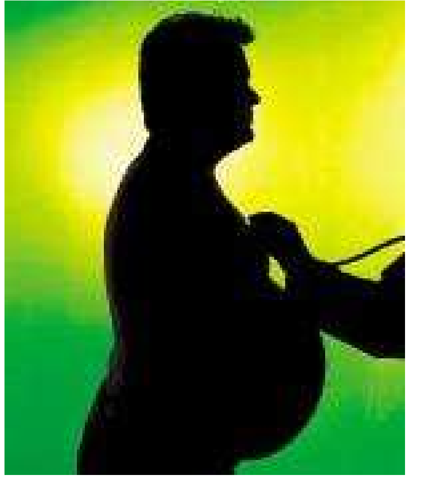
SPEKTROGRAMM

FORSCHUNG AKTUELL

THEMEN

Titelbild: Kein Idyll auf dem Blauen Planeten: Viele Menschheitsfragen sollten jetzt entschieden werden
Bild: Nasa

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet
🔊 Diesen Artikel können Sie auch anhören, siehe: www.spektrum.de/audio



SEITE 24

GESUNDHEIT

Übergewicht überschätzt?

Könnte es sein, dass Dicksein kein ernsthaftes Gesundheitsrisiko darstellt – zumindest für die meisten der übergewichtigen oder gar fettleibigen Menschen?

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

SEITE 66

IMMUNOLOGIE

Prägende Muttermilch

Sie versorgt den Säugling in der ersten Zeit seines Lebens mit Abwehrstoffen. Zumindest im Tierexperiment wirkt sich diese Leihimmunität sogar auf das spätere Funktionieren der Abwehrkräfte aus

SEITE 78

PHYSIK

Variable Naturkonstanten

Die fundamentalen Größen unserer Welt haben womöglich nicht überall und nicht zu allen Zeiten die gleichen Werte wie hier und jetzt – mit surrealen Folgen für die Naturgesetze





OZEANOGRAFIE SEITE 56

Wellen unter Wellen

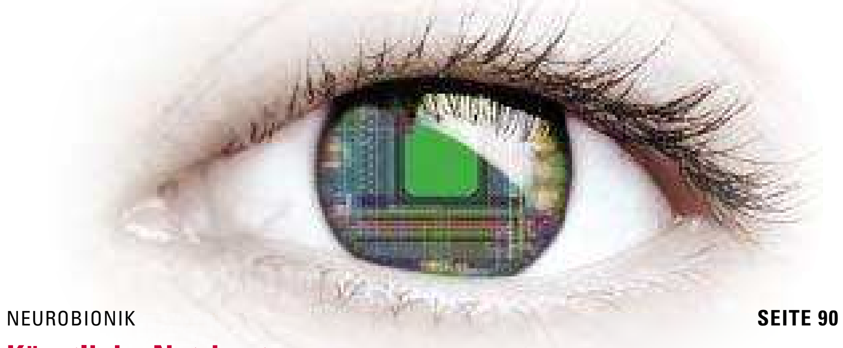
Im Wechsel der Gezeiten durchziehen seltsame Wogen den tiefen Ozean. Dabei formen sie unter anderem die Kontinentalhänge



SERIE: DIE WELT IM JAHR 2050 Teil I

Menschheit am Scheideweg

Was wir jetzt entscheiden müssen, damit wir noch eine lebenswerte Zukunft haben



NEUROBIONIK SEITE 90

Künstliche Netzhaut

Den natürlichen Neuronennetzen im Auge und im Gehirn nachempfunden sind »neuromorphe Mikrochips«. Besser und viel effizienter als frühere Konstruktionen ermöglichen sie Blinden und Robotern das Sehen

SEITE 110

ESSAY

Intelligent Design – wo bleibt die Wissenschaft?

In den USA versuchen so genannte Kreationisten religiöse Vorstellungen gegen die Evolutionstheorie in die Schulen zu tragen. Der Philosoph Daniel C. Dennett streitet der »Kontroverse« jede Wissenschaftlichkeit ab

OKTOBER 2005

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT FÜR ABONNENTEN



UNIVERSITY OF COLORADO / UNIVERSITY OF HAWAII / NOAO

Blick ins All

Impressionen der besonderen Art – schauen Sie mit den Augen der weltgrößten Teleskope ins Universum

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

Schutzwälle gegen Spam

Juli 2005

Da auch ich ein Leidtragender bin, habe ich Ihren Artikel mit großem Interesse gelesen. Es ist schon verblüffend, wie viel Genie der Mensch hervorbringt um etwas wieder loszuwerden, das er selbst hervorgerufen hat. Große Anerkennung an die Verfasser der SPAM-Filter, nur denke ich, dass das am Problem vorbeigeht. So, wie in der Medizin lange nicht erkannt wurde, dass Sauberkeit und Hygiene ein wesentlicher Faktor für Gesundheit ist, ist für E-Mails ein Hygieneprozess nötig, der kranke E-Mails eindeutig erkennt, isoliert und löscht.

Das ist eigentlich sehr einfach: E-Mails brauchen nur digital signiert zu werden. Praktisch alle E-Mail-Clients sind in der Lage digitale Signaturen zu erstellen und zu prüfen. Werden für die Ausstellung von Zertifikaten anerkannte Zertifizierungsdiensteanbieter genutzt, die die Identität des Zertifikatsinhabers halbwegs brauchbar überprüfen, ist das Problem rasch vom Tisch. Alle nicht signierten E-Mails können sofort gelöscht werden, oder es lässt sich leicht herausfinden, wer der tatsächliche Absender beziehungsweise Signator ist. Damit erhält der Empfänger ein wirksames Mittel zur Durchsetzung seiner Interessen.

Ich verweise in diesem Zusammenhang auch auf die Initiativen der Europäischen Union und der Regierungen, im Rahmen von E-Government signaturfähige Chipkarten unter das Volk zu bringen. Die Infrastruktur für E-Mail-Signatur wäre daher voraussichtlich schon sehr bald vorhanden. Man muss es nur tun.

Ing. Josef Bogad, Mauerbach, Österreich

Briefe an die Redaktion …

… richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 104840
D-69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com

Ein Blick ins Innere des Körpers

Wissenschaft im Alltag, Juli 2005

Der Vergleich der Strahlenbelastung einer CT-Untersuchung von 3 bis10 Millisievert (mSv) mit der natürlichen Hintergrundstrahlung – in Deutschland auf Meereshöhe 2,5 mSv – verharmlost in seiner Verkürzung das Risiko einer solchen Untersuchung. Die letzte Angabe bezieht sich nämlich auf die Dosis pro Jahr (Dosisleistung), während die CT-Daten eine einmalige Strahlenbelastung angeben (so genannte Äquivalentdosis).

Differenziert man zudem Hautoberflächen und Organe, können lokal noch wesentlich höhere Werte auftreten. Mit anderen Worten: Eine einmalige CT-Untersuchung kann ein Mehrfaches der gesamten jährlichen natürlichen Strahlendosis ausmachen. Ohne den Nutzen strahlenmedizinischer Diagnostik in Frage stellen zu wollen – jede Röntgenuntersuchung erhöht signifikant die Gesamtbelastung durch ionisierende Strahlen.

Dr. Andreas Kronz, Göttingen

Wer fördert die Daniel Düsentriebs?

August 2005

Bereits heute fördert die Industrie- und Handelskammer die ökonomische Bildung an Schulen. Henry Petroski schlägt vor, »Ingenieurwissenschaft während der Schulzeit als solche zu lehren«. Als Nächstes sind wohl die Juristen dran, juristisches Wissen im Lehrplan zu verankern.



MANFRED ZENTSCH / GEHIRN&GEIST

▲ Eine gut verankerte Basis in den Kernfächern ist Voraussetzung für ein erfolgreiches Weiterkommen.

Das alles verstärkt den Trend zu Vielwisserei an unseren Schulen. Das Denken in grundlegenden Strukturen und Zusammenhängen ist bereits heute weit gehend zu Gunsten eines Schubladendenkens verdrängt. Die Freude am Problemlösen kommt mangels Zeit zu kurz. Und damit geht genau das verloren, was für ein gelingendes Ingenieurstudium so wichtig ist: eine gesunde und gut verankerte Basis – vor allem auch in den Kernfächern, insbesondere in der Mathematik. Diese Basis fehlt nicht nur den Studierenden des Maschinenbaus.

Jemandem, der nicht einmal mehr schriftlich dividieren kann, wird der Informatikprofessor nur sehr schwer klar machen können, was sich in einem Computer abspielt. Wer nicht weiß, was eine Probe ist, bringt schlechte Voraussetzungen für jegliches Stu dium mit. Und das Schlimmste ist: Heutige Studienanfänger sehen kaum einen Bezug der Mathematik zur »wirklichen Wirklichkeit«. Da gibt es noch weit interessantere Beispiele als »Schuhe binden« und »Kekse essen«.

Prof. Timm Grams, Fulda

Immer wieder sonntags …

Leserbrief, Juli 2005

Nicht erst Tolkien hatte die Idee und Dr. Fuß hat sich ebenfalls nichts Neues einfallen lassen. Die folgenden Zeilen stammen aus einem Gedicht von Erich Kästner aus den 1930er Jahren:

Der dreizehnte Monat

Wie säh er aus, wenn er sich wünschen ließe? / Schaltmonat wär? Vielleicht Elfember hieße? / Wem zwölf genügen, dem ist nicht zu helfen. / Wie säh er aus, der dreizehnte von zwölfen?

Das Korn wär gelb. Und blau wären die Trauben. / Wir träumten, und die Erde wär der Traum. / Dreizehnter Monat, laß uns an dich glauben! / Die Zeit hat Raum!

Verzeih, daß wir so kühn sind, dich zu schildern. / Der Schleier weht. Dein Antlitz bleibt verhüllt. / Man macht, wir wissen's, aus zwölf alten Bildern / kein neues Bild.

Es tickt die Zeit. Das Jahr dreht sich im Kreise. / Und werden kann nur, was schon immer war. / Geduld, mein Herz. Im Kreise geht die Reise. / Und dem Dezember folgt der Januar.

Geert Henning Seidel, Schriesheim

Die zehn Geschlechter von Amarete

Juli 2005

Der Blick auf eine sprachlich wie sozial anders gegliederte Gemeinschaft schärft den Blick auf unsere eigene. Und da finde ich etliche Parallelen.

Nehmen wir Herrn Ratzinger, der als Kardinal wohl in einer wichtigen, aber dennoch untergeordneten Position war: männlich weiblich

vielleicht. Jetzt ist er klar und unübersehbar in einer männlich männlichen. Umgekehrt musste Herr Köhler oft genug hören, dass der Bundespräsident sich nicht zu sehr in die aktuelle Politik einmischen sollte. Dieses Amt ist wohl weiblich. Konrad Adenauer hat deshalb darauf verzichtet.

Auch in kleineren Gruppen, etwa einem Dorf, lassen sich ähnliche Dinge beobachten oder werden in Theaterstücken dargestellt. So ist der Postwirt auch Bürgermeister und hat die besten Äcker: männlich männlich. Seine Frau – zumindest im Volksstück – ebenfalls. Der Zugezogene, oder im Theater der sich als Schwiegersohn anpirschende Jungmann, ist weiblich weiblich, bis er sich als weiblich männlich herausstellt.

Die Haustechnik ist meist weiblich weiblich. Bricht jedoch das Computernetz zusammen, wird plötzlich der Techniker zur umworbenen Person aufgemännlicht, jedenfalls für das Ritual der Regenerierung.

Viele andere Rituale ließen sich in dieser Sprache ausdrücken. Die Leute von Amarete wüssten auch den Grund: Das ist schon immer so gewesen, seit der Geburt der Welt.

Peter Rauschmayer, München

Rätselhafte Supernovae

Leserbrief, September 2005

Die Diskussion um die Richtigkeit von Begriffen außerhalb von Kontexten ist sinnlos – zumal wenn weder Sprache noch Etymologie beachtet werden.

In der angelsächsischen Welt haben die Tierkreiszeichen lateinische Namen. »Cancer« ist ein lateinisches Wort, die englische Übersetzung ist »crab«. Demnach ist Crab Nebulae nichts mehr als die englischsprachige Entsprechung von Cancer Nebulae, aber so heißen sie nun mal nicht.

In der Zoologie gilt eine strengere Taxonomie, dort gelten andere Regeln. Im Deutschen sind Krebse (=Krebstiere) zu unterteilen in Kurzschwänzige und Langschwänzige und andere.

Die Kurzschwänzer heißen Krabben und die Langschwänzer haben keinen besonderen Namen – außer der lateinischen Bezeichnung. Auch im angelsächsischen Raum ist diese Taxonomie geläufig, Krebstiere heißen Crustaceans, Kurzschwänzer Crabs, Langschwänzer Shrimps.

Man sollte also nicht von »falscher Übersetzung« sprechen – im Kontext der Astro-Wissenschaft ist die Übersetzung mit Krebsnebel völlig schlüssig, denn schließlich ist auch jede Krabbe ein Krebs. Man hätte auch Krabben-Nebel sagen können, aber das hat man nun mal nicht getan.

Klaus Burgarth, Rosengarten

Errata:

Rätselhafte Supernova-Explosionen
Juli 2005

Die Achsen zu den Simulationsbildern sind falsch beschriftet, es muss statt Kilometer Zentimeter heißen.

Hurrikane an der Leine
August 2005

Im Kasten »Die Steuerung simulierter Stürme« ist uns bei der Umrechnung von Meilen pro Stunde ein Fehler unterlaufen: Die richtigen Werte in der Skala müssen von unten nach oben heißen: 12, 17, 33, 42, 49 und 58 Meter pro Sekunde.

Die Redaktion

Umbruch und Aufbruch auf Russisch

Editorial, Juli 2005

Selbstverständlich sind viele Aussagen im Editorial und auch in Ihrem Tagebuch (Website) richtig – dennoch bin ich nicht mit allem einverstanden.

Natürlich, das wissen wir alle, geht es der russischen Wissenschaft schlecht.

Wenn wir aber unsere Verhältnisse ansehen, bin ich mir sicher, dass wir nicht berechtigt sind, eine so negative Conclusio (»Da kann es freilich noch etwas dauern, bis wir wieder über russische Forschung berichten können«) abzudrucken.

Zweimal hatte ich das Glück, an die Lomonossow-Universität zu Vorträgen eingeladen zu werden: ein so hohes Niveau, eine derart lebhafte und positive Diskussionskultur, Offenheit und auch breite Streuung der Meinungen habe ich bisher nicht erlebt. Noch nie und nirgendwo habe ich bei Kongressen so viel gelernt wie in Russland.

Russland ist viel fortschrittlicher, als wir glauben.

Dr. Roland K. Eberwein, Klagenfurt

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Heidelberg, HRB 2766
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Kai Kumpf, Dr. Susanne Lipps, SciTech Communications GmbH, Claus-Peter Sesin, Dr. Hans Zekl.
Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o Zenit Pressevertrieb GmbH, Julius-Hölder-Str. 47, D-70597 Stuttgart-Degerloch, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Hartmut Brendt, Tel. 0211 6188-145, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße 17/I, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: fs//partner, Stefan Schließmann, Friedrich Sültemeier, Bastionstraße 6a, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 862997-0, Fax 0211 132410; Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, D-80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 26 vom 01.01.2005.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: John Sargent, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President/Managing Director, International: Dean Sanderson

VALERIE C. CLARK, CORNELL UNIVERSITY

Der südamerikanische Pfeilgiftfrosch *Phyllobates terribilis* enthält genügend Gift, um bis zu zehn Menschen zu töten.

EVOLUTION

Frösche mit geborgtem Gift

Schon die grellbunte Haut vieler giftiger Tiere verrät, dass man besser die Finger von ihnen lässt. Nun haben Wissenschaftler um Valerie Clark von der Cornell-Universität in Ithaca (US-Bundesstaat New York) herausgefunden, dass zwei Froschfamilien in weit entfernten Regionen des Globus nicht nur ähnliche Warnfarben benutzen, sondern sich auch mit dem gleichen Trick

TECHNIK

Fühlende Roboterfinger

Der Traum vom künstlichen Menschen rückt näher – oder zumindest der von einem menschlicheren Roboter. So hat ein Team um Takao Someya an der Universität Tokio jetzt eine flexible Kunsthaut entwickelt, die Temperatur und Druck fühlen kann.

Elektronische Sensoren für diese Parameter gibt es zwar schon lange. Aber da sie auf Siliziumbasis arbeiten, sind sie nicht für größere Flächen geeignet und kaum biegsam oder gar elastisch – Voraussetzung für eine Kunsthaut, mit der sich eine Roboterhand bespannen lässt. Deshalb griffen die japanischen Forscher auf organische Halbleiter zurück. Obwohl biegsam, sind auch diese allerdings nicht dehnbar. Die Lösung des Problems: Someya und seine Mitarbeiter knüpften zwischen zwei speziellen Plastikschichten ein Netzwerk aus elektrischen Leitern, organischen Halbleitern und stromundurchlässigem Material. Um die Flexibilität der Folie noch zu erhöhen, stanzten sie in regelmäßigen Abständen Löcher hinein. Dadurch ließ sich die künstliche Haut um 25 Prozent dehnen und bis zu einem Radius von zwei Millimeter Durchmesser krümmen.

Für Testzwecke spannten die Forscher die Folie auf ein Hühnerei. Trotz der starken Verformung maßen die Sensoren Druck und Temperatur zuverlässig. Allerdings verschleißt das Material bei hoher Beanspruchung noch zu schnell.

PNAS, 30.8. 2005, S. 12321

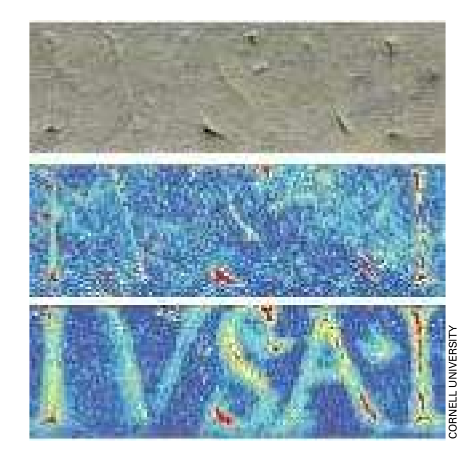
▼ Auch wenn die elektronische Kunsthaut über ein Ei gespannt wurde, maß sie Temperatur und Druck zuverlässig.

TAKAO SOMEYA GROUP, UNIVERSITÄT TOKIO

ARCHÄOLOGIE

Unsichtbare Inschriften lesbar gemacht

Zu allen Zeiten haben Menschen denkwürdige Ereignisse auf Stein verewigt. Viele alte Inschriften sind jedoch so stark verwittert, dass es nicht mehr gelingt, sie zu entziffern. Ein Forscherteam aus Historikern und Physikern an der Cornell-Universität in Ithaca (US-



CORNELL UNIVERSITY

fast denselben Giftcocktail zulegen. Weder die Goldfröschchen (Mantellen) in Madagaskar noch die südamerikanischen Farbfrösche – wie der berüchtigte Pfeilgiftfrosch *Phyllobates terribilis* – können ihre todbringenden Substanzen selbst synthetisieren. Sie beziehen diese so genannten Alkaloide vielmehr von den Ameisen und Tausendfüßern auf ihrem Speisezettel. Die Haut von *Phyllobates* enthält dadurch genug Gift, um bis zu zehn Menschen zu töten.

Die Frösche auf Madagaskar und in Südamerika sind ebenso wenig miteinander verwandt wie die von ihnen verzehrten Gliederfüßer. Dennoch teilen die Mantellen, wie Clark nun herausfand, bis zu 75 Prozent der Alkaloide mit ihren schon früher eingehend untersuchten südamerikanischen Kollegen. Erstaunlicherweise ist die Evolution über die Kontinente hinweg also auf denselben Trick gekommen.

PNAS, 16. 8. 2005, S. 11617

Bundesstaat New York) hat nun neue Wege beschritten, sie lesbar zu machen. Dazu beschoss es 1800 bis 2400 Jahre alte, stark verwitterte Marmorinschriften mit hochintensiven Röntgenstrahlen aus einem Teilchenbeschleuniger. Diese schlugen beim Auftreffen auf die Steinoberfläche Elektronen aus den Atomen heraus. Als Folge trat eine Fluoreszenz auf, die für das jeweilige Element charakteristisch ist und mit einem Spektrometer gemessen werden konnte. Dabei fanden sich Spuren von Eisen, Zink und Blei, die wie von Geisterhand die alten Texte nachzeichneten.

Des Rätsels Lösung: Üblicherweise wurden die Inschriften mit Eisenmeißeln in den Stein gehauen und mit einer Farbe ausgemalt, die häufig aus Metalloxiden bestand. Das erklärt die Spuren von Eisen und Blei. Die Herkunft des Zinks ist dagegen noch unklar. *Zeitschrift für Papyrologie und Epigraphik, Bd. 152, S. 221*

◀ Auf dem Foto (oben) ist die Inschrift praktisch nicht zu sehen. Röntgenspektroskopisch nachgewiesene Eisenspuren lassen den Text ahnen (Mitte). Bleispuren zeigen ihn eindeutig (unten).

PHYSIK

Licht in der Falle

Laserlichtpuls
Kontrollstrahl
gebeugtes Laserlicht
reflektierter Kontrollstrahl

Ist der Kontrollstrahl an, kann das Laserlicht den Kristall passieren.

JEVON LONGDELL, AUSTRALIAN NATIONAL UNIV

■ Licht bewegt sich unvorstellbar schnell: Pro Sekunde legt es im luftleeren Raum etwa 300 000 Kilometer zurück. Doch mit Tricks lässt es sich vorübergehend sogar stoppen. Wissenschaftler der australischen Nationaluniversität in Canberra konnten einen Lichtpuls nun für mehr als eine Sekunde anhalten – tausendmal so lang wie bei früheren Experimenten.

Ihre Lichtfalle besteht aus einem heliumgekühlten, fünf Millimeter hohen Würfel aus Yttriumsilikat, das mit dem Seltenerdmetall Praseodym dotiert ist. Ein so genannter Kopplungsstrahl manipuliert den Kristall so, dass ein entgegenkommendes Lichtpaket, das eigentlich absorbiert würde, hindurchtreten kann. Wird der Strahl im rechten Moment ausgeknipst, bleibt das Paket im Würfel »stecken«. Sein Quantenzustand geht dabei auf den Kernspin der Atome im Kristall über und hinterlässt dort quasi einen Abdruck. Sobald der Kopplungsstrahl wieder angeht, setzt der Lichtimpuls seinen Weg unverändert fort. Die enorme Verlängerung der möglichen Speicherzeit erreichten die australischen Forscher dadurch, dass sie die Lebensdauer des Spinzustands im Kristall erhöhten, indem sie ein angelegtes Magnetfeld hochpräzise auf einen bestimmten Wert justierten.

Den Quantenzustand von Licht zu speichern und wieder abzurufen ist eine wichtige Voraussetzung für die Schaffung optischer Computer, die Informationen viel schneller verarbeiten könnten als ihre elektronischen Pendants.

Physical Review Letters, 2. 8. 2005, Nr. 063601

PLANETOLOGIE

Eislinse auf dem Mars

■ Sie sieht aus wie ein verfärbtes Spiegelei: die mehrere Dezimeter dicke Wassereisfläche, welche die hochauflösende Stereokamera der europäischen Sonde Mars Express auf dem Roten Planeten fotografiert hat. Das fast kreisrunde gefrorene Nass bedeckt eine etwa 200 Meter hohe Sanddüne inmitten eines rund zwei Kilometer tiefen und 35 Kilometer breiten Kraters, der bei 70,5 Grad Nord und 103 Grad Ost in einer Ebene namens Vastitas Borealis liegt. Auch der südliche Kraterrand ist mit einer dünnen Reifschicht überzogen.

Mars Express hatte zwar letztes Jahr bereits in der Nähe des Südpols spektroskopisch größere Mengen von gefrorenem Wasser nachgewiesen – und die US-Sonde »Mars Odyssey« 2002 sogar schon eine ausgedehnte Eisschicht unter dem Boden. So augenfällig wie nun – in Form einer reinen, schneeweißen Linse – konnte Wassereis auf dem Mars jedoch noch nie dokumentiert werden. Dass der Schnappschuss erst jetzt gelang, liegt an den klimatischen Bedingungen auf dem Roten Planeten. Während eines Großteils des dortigen Jahres ist die Nordpolarregion von gefrorenem Kohlendioxid bedeckt. Im Mars-Sommer, wenn Temperaturen bis zu zwanzig Grad Celsius herrschen, sublimiert es jedoch. Das Wassereis dagegen kann sich das ganze Jahr hindurch halten.

Pressemitteilung der DLR vom 28. 7. 2005



Eisiges Spiegelei: Im Innern eines Marskraters liegt eine Linse aus Wassereis.

ESA / DLR / FU BERLIN, GERHARD NEUKUM



NASA / JPL-CALTECH / SSC / R. HURT

Nach jüngsten Untersuchungen ist die Milchstraße eine Balkengalaxie und könnte, von außen betrachtet, so aussehen.

ASTRONOMIE

Milchstraße mit Sternenbalken

Ausgerechnet von unserer kosmischen Heimat, der Milchstraße, können wir uns nur schlecht ein Gesamtbild machen. Weil wir Teil davon sind, haben wir zwar einen hervorragenden Nahblick auf benachbarte Spiralarme und einzelne Sterne. Doch genau diese Ansicht von innen macht es sehr schwierig, die Struktur im Ganzen zu erfassen.

Astronomen konnten nun das Zentrum der Milchstraße, das im Sternbild Schütze hinter dunklen Gaswolken verborgen liegt, mit bisher unerreichter Genauigkeit vermessen. Dabei bestätigte sich eine alte Vermutung: Die Sterne dort gruppieren sich zu einem gewaltigen Balken, der mit einer Länge von 27000 Lichtjahren mehr als ein Viertel der Milchstraße durchmisst. Wir leben also im Innern einer Balkengalaxie. Für die Vermessung nutzten Forscher um Ed Churchwell von der Universität von Wisconsin in Madison das im Erdorbit stationierte Spitzer-Teleskop, das für Infrarotstrahlung empfindlich ist. Diese kann die Gaswolken im Sternbild Schütze durchdringen und damit Informationen vom Zentrum der Milchstraße liefern. So ließen sich die Positionen von 30 Millionen Sternen bestimmen.

Die Beobachtungen zeigen, dass in dem Balken alte, rot leuchtende Sterne überwiegen. Erstmals konnte auch seine Orientierung ermittelt werden: Er bildet mit der Verbindungslinie vom Sonnensystem zum Zentrum der Milchstraße einen Winkel von 45 Grad.

Astrophysical Journal Letters, 10.9.2005, S. L149

PALÄANTHROPOLOGIE

Lucy ging aufrecht

Wie bewegte sich Lucy fort? Der Anordnung des Sprungbeins und der Anatomie des Kniegelenks zufolge ging unsere Urahnin, deren Skelett 1974 in Äthiopien gefunden wurde, bereits auf zwei Beinen. Doch könnte sie mit ihren kurzen Schenkeln, langen Armen und Greifzehen auch vornübergebeugt wie ein Schimpanse gewatschelt sein, statt aufrecht wie ein Mensch zu schreiten. Ein Team um William Sellers von der Universität Loughborough (England) hat jetzt die Gangart von *Australopithecus afarensis* – jener Hominidenspezies, die vor 3,6 bis 2,9 Millionen Jahren lebte und der die 3,2 Millionen Jahre alte Lucy angehörte – neu analysiert.

Die Forscher verfügen über ein Computermodell, das bei Menschen für gegebene Schrittlängen und Laufgeschwindigkeiten den Energieaufwand berechnen kann. Dieses wandten sie nun auf einen Primaten mit Lucys Körperbau an und reproduzierten damit fossile Fußspuren von Australopithecinen. Solche 3,5 Millionen Jahre alten Abdrücke in Vulkanasche waren 1978 bei Laetoli in Tansania entdeckt worden.

Der Simulation nach wäre ein affenartiger Gang für Lucy viel zu anstrengend gewesen. Dagegen konnte sie mit aufrechter Körperhaltung Geschwindigkeiten zwischen 0,6 und 1,3 Meter pro Sekunde erreichen, ohne sich zu verausgaben. Das entspricht immerhin einem langsamen Schritttempo.

Journal of the Royal Society Interface, Online-Vorabveröffentlichung, doi 10.1098/rsif.2005.0060

PALÄONTOLOGIE

Menschenähnlicher Saurier

Zusammengerollt mit angewinkelten Vorderbeinen lag der heranwachsende Dinosaurier in seiner Eierschale. Warum der fertig entwickelte Embryo vor 190 Millionen Jahren nicht das Licht der Welt erblickte, wird wohl immer ein Geheimnis bleiben. Doch seine fossilen Überreste, die Wissenschaftler um Robert R. Reisz von der Universität Toronto (Kanada) kürzlich entdeckten, gewähren spannende Einsichten in das Leben der frühen Dinosaurier.

Der Fund ist der älteste fossile Embryo eines Landwirbeltiers, und sein ausgezeichneter Zustand erlaubt die Zuordnung zum bereits gut untersuchten *Massospondylus carinatus*. Wie alle Prosauropoden – jene frühen Echsen, die bis vor etwa 180 Millionen Jahren die Erde beherrschten – ernährte sich der langhalsige Koloss von Pflanzen. Er wurde mit fünf Metern so lang wie eine Giraffe, war aber doppelt so schwer und lief vorwiegend auf zwei Beinen.

Nach der Geburt allerdings, so das überraschende Ergebnis des jüngsten Funds, krabbelte er erst einmal auf allen vieren. Der Körperbau des fossilen Skeletts mit großem Kopf, langen Vorderbeinen und einem kurzen Schwanz zwingt zu diesem Schluss. Mit dem Heranwachsen veränderten sich die Körperproportionen so, dass sich das Tier aufrichten und auf zwei Beinen gehen konnte.

Die Entwicklung vom Vier- zum Zweibeiner im Lauf des Lebens gibt es im Tierreich nur noch ein weiteres Mal – bei uns Menschen. Und noch etwas verbindet uns mit unseren fernen Verwandten. Die zunächst zahnlosen Dinosaurierbabys konnten wohl nicht ohne fremde Hilfe überleben. *Massospondylus* wäre damit das älteste Beispiel für elterliche Fürsorge.

Science 29.7.2005, S. 761

Der fünfzehn Zentimeter lange Embryo von *Massospondylus carinatus* wäre als Vierbeiner geschlüpft und beim Heranwachsen zum Zweibeiner geworden.


ROBERT R. REISZ, UTM

Mitarbeit: A. Schneider, S. Keilmann und S. Hügler

Fesselndes Rauptier

Hier zu Lande sind Raupen Vegetarier. Doch in der Südsee haben auch sie Appetit auf Fleisch entwickelt. Einen wahren Gourmet konnten nun Forscher auf Hawaii ausmachen *(Science, Bd. 309, S. 575)*. *Hyposmocoma molluscivora* labt sich wie menschliche Feinschmecker mit Vorliebe an Schnecken. Dafür treibt die Raupe einigen Aufwand. Da sie nicht die Schnellste ist, jagt sie ihr Opfer nicht, sondern lauert ihm auf. Zur Tarnung verfügt sie über ein selbst gesponnenes Gehäuse in Form eines Ästchens. Sobald nun eine Tornatellides-Schnecke in ihre Nähe gerät, kriecht sie hervor und produziert Spinnenfäden, mit denen sie das Opfer an den Untergrund fesselt. Dann verkeilt sie ihre Hülle unter die Öffnung des Schneckenhauses und zwängt sich hinein. Für die Beute gibt es kein Entrinnen: Die Raupe folgt ihr in die letzten Windungen und frisst sie ratzekahl auf.



SCIENCE

Diesen Artikel können Sie auch anhören, siehe: www.spektrum.de/audio

ASTRONOMIE

Planet X oder großer Asteroid?

Ein neu entdeckter Sonnentrabant zwingt die Astronomen, sich genauer zu überlegen, was eigentlich ein Planet ist.

Von Thomas Bührke

Fast genau 75 Jahre nach der Entdeckung des Planeten Pluto haben US-Astronomen noch weiter draußen im Sonnensystem ein mindestens genauso großes Objekt aufgespürt. Damit könnten Michael E. Brown vom California Institute of Technology in Pasadena, Chad Trujillo vom Gemini-Observatorium auf Hawaii und David Rabinowitz von der Yale-Universität in New Haven (Connecticut) als Entdecker des zehnten Planeten in die Geschichte eingehen.

Doch ob ihnen diese Ehre wirklich zuteil wird, ist noch ungewiss. In der Vergangenheit hatten sie schon mehrfach vergeblich darauf gehofft. Den zuvor von ihnen entdeckten Aspiranten mit den klangvollen Namen Quaoar, Sedna und Orcus blieb allesamt die Anerkennung versagt. Bevor die Internationale Astronomische Union (IAU) den begehrten Status an weitere Himmelskörper vergibt, will sie jetzt erst einmal genau definieren, was überhaupt ein Planet ist.

Gefunden hatten die US-Forscher den neuen Sonnentrabanten mit der Bezeichnung 2003 UB313 schon im Januar dieses Jahres. Doch erst ein halbes Jahr später meldeten sie ihre Entdeckung an die zuständige Zentrale, das Minor Planet Center in Cambridge (Massachusetts). Üblicherweise alarmiert ein Astronom diese Einrichtung sofort. Das Zentrum prüft die Meldung und verbreitet sie dann per E-Mail und Internet. Brown und seine Kollegen zögerten die Bekanntgabe bewusst hinaus, um Zeit zu gewinnen: Sie wollten 2003 UB313 erst selbst genauer unter die Lupe nehmen, bevor sich ihre Kollegen darauf stürzen konnten.

Seit vier Jahren sucht das Team mit dem Oschin-Teleskop auf dem Mount Palomar bei San Diego (Kalifornien) Teile des Himmels per Computer systematisch nach Objekten ab, die sich vor dem Sternenhintergrund bewegen. Zunächst war der Sonnentrabant der Suchroutine entgangen, weil er sehr langsam über den Himmel wandert. Erst bei einer nachträglichen Datenanalyse von Bildern aus dem Jahr 2003 fiel er auf.

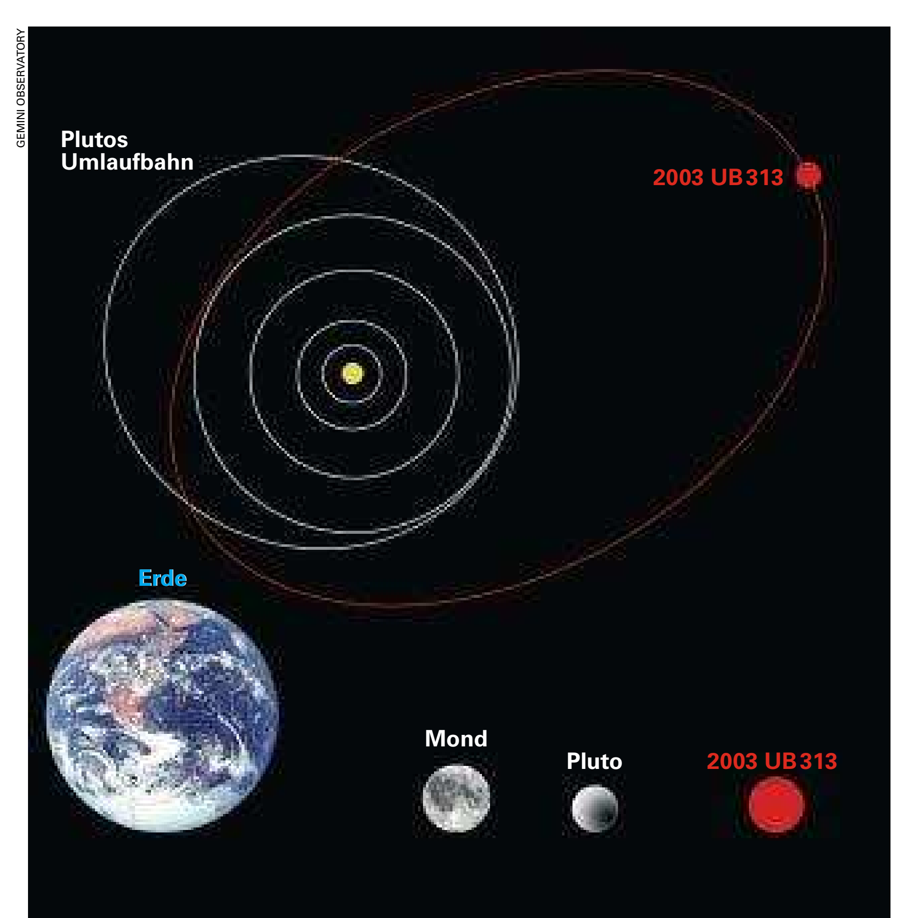
Größer als Pluto

2003 UB313 läuft auf einer stark elliptischen Bahn in 560 Jahren einmal um unser Zentralgestirn. Dabei schwankt sein Abstand zu ihm zwischen 38 und 98 Astronomischen Einheiten (eine AE entspricht der mittleren Distanz zwischen Erde und Sonne). Derzeit ist das Objekt 97 AE von der Sonne entfernt. Zum Vergleich: Plutos Umlaufbahn variiert zwischen 30 und 49 AE; für einen Umlauf benötigt der neunte Planet 248 Jahre.

Bislang lässt sich die Größe von 2003 UB313 nicht genau angeben. Aus Helligkeit und Entfernung kann man nur dann den Durchmesser ermitteln, wenn die Reflektivität der Oberfläche bekannt ist. So erscheint ein kleiner, stark reflektierender Planet unter Umständen heller als ein großer dunkler. Immerhin ist es Brown und seinen Kollegen aber gelungen, den möglichen Größenbereich einzugrenzen.

Einerseits haben sie nämlich erfolglos versucht, 2003 UB313 mit dem Weltraumteleskop Spitzer aufzuspüren. Dieses ist im Infrarotbereich empfindlich, wo die Himmelskörper Wärmestrahlung abgeben. Da 2003 UB313 damit nicht nachweisbar war, kann sein Durchmesser höchstens 3500 Kilometer betragen. Andererseits gelang es mit dem Gemini-Teleskop auf Hawaii, auf der Oberfläche Methaneis zu identifizieren. Demnach sollte das Objekt dem Pluto ähneln und wie dieser sechzig Prozent des Sonnenlichts reflektieren. In diesem Fall hätte es einen Durchmesser von 2860 Kilometern – 560 Kilometer mehr als der neunte Planet. Selbst bei einer unrealistisch hohen Reflektivität von hundert Prozent wäre der Körper nach Browns Berechnungen immer noch genauso groß wie Pluto.

Damit müsste man 2003 UB313 als zehnten Planeten einstufen, und die drei Forscher dürften sich in einer Reihe mit Clyde Tombaugh, Johann Gottfried Galle und Wilhelm Herschel nennen, den



Der neu entdeckte Sonnentrabant 2003 UB313 ist größer als Pluto, vermutlich genauso aufgebaut und beschreibt eine stark exzentrische Bahn.



So malt sich ein Künstler den Blick von 2003 UB313 zur fernen, schwachen Sonne aus.

Entdeckern von Pluto, Neptun und Uranus. Doch das lehnt die IAU zunächst noch ab. Angesichts immer häufigerer Entdeckungen von Himmelskörpern jenseits der Plutobahn hat sie eine neue Arbeitsgruppe eingerichtet, die Kriterien erarbeiten soll, die ein Planet erfüllen muss. Solange dieses Team keine eindeutige Definition abgegeben hat, wird jeder Körper in den Außenbezirken des Sonnensystems den so genannten Trans-Neptun-Objekten zugeordnet.

Neuordnung im Sonnensystem

Im Endergebnis könnte die IAU auch Pluto den Planetenstatus aberkennen. Einen solchen Antrag brachten schon vor zwei Jahren einige Astronomen ein, nachdem die überraschend großen Asteroiden Varuna, Quaoar und Sedna aufgetaucht waren. Pluto und all die neu entdeckten Objekte würden dann als Mitglieder des so genannten Kuiper-Gürtels eingestuft. Dies ist ein Gebiet jenseits des Planeten Neptun, in dem man bis heute über tausend Kleinplaneten gefunden hat. Für eine solche Neuregelung spräche auch, dass die Bahnen dieser Körper meist sehr exzentrisch und ungewöhnlich stark gegen die Hauptebene der Planetenbahnen, die Ekliptik, geneigt sind – Pluto um 17 und 2003 UB313 sogar um 45 Grad. Diese unerwartete Schieflage war auch ein Grund dafür, dass bislang niemand auf den Himmelskörper gestoßen ist. Die meisten Suchprogramme beschränken sich auf Bereiche nahe der Ekliptik.

Den damaligen Antrag auf eine Neuordnung im Sonnensystem lehnte die IAU jedoch ab – mit der Begründung, die neuen Mitglieder des Sonnensystems seien kleiner als Pluto. Dieses Argument zieht nun nicht mehr.

Brown setzt sich indes dafür ein, Pluto weiterhin zu den Planeten zu zählen – auch wenn das aus rein wissenschaftlicher Sicht nicht mehr gerechtfertigt erscheint. Dabei argumentiert er vor allem mit dem kulturellen Aspekt; schließlich gelte der nach einem römischen Gott benannte Sonnentrabant nun schon seit 75 Jahren als Planet. Entsprechend plädiert Brown für die Lösung, alle Objekte, die größer als Pluto sind, in den illustren Zirkel aufzunehmen.

Dahinter darf man sicher auch seine Ambition vermuten, als Entdecker des zehnten Planeten in die Geschichte einzugehen. Da durchaus die Möglichkeit besteht, dass in Zukunft noch mehr große Mitglieder des Kuiper-Gürtels entdeckt werden, droht allerdings eine Planeteninflation. Bei den Asteroiden jedenfalls geht der Entdeckungsboom munter weiter: Erst im Juli spürten Browns Team und eine Forschergruppe um Jose-Luis Ortiz vom Sierra Nevada Observatory zwei neue Exemplare auf, die etwa halb so groß wie Pluto sind und die Bezeichnungen 2003 EL61 und 2005 FY9 tragen.

Die IAU steht damit vor einer historischen Entscheidung. Im kommenden Jahr will sie auf ihrer Tagung in Prag über den Status von Himmelskörpern in den Außenbezirken des Sonnensystems entscheiden. Vorher wird 2003 UB313 auch keinen Namen erhalten.

Thomas Bührke ist promovierter Astronom und lebt als Wissenschaftsautor in Leimen.

MOLEKULARBIOLOGIE

Hefen helfen BSE-Forschern

Pilze bekommen keinen Rinderwahn, haben aber die ihn verursachenden Prionen. Dies brachte jetzt die Erforschung der faserigen Amyloid-Ablagerungen, die bei BSE – und auch beim Alzheimer-Syndrom – das Gehirn zerstören, ein gutes Stück weiter.

Von Michael Groß

Wenn sich ein wichtiges biochemisches oder strukturbiologisches Problem als harte Nuss entpuppt, lohnt es sich für die frustrierten Forscher oft, sich ein wenig in der Natur umzuschauen, ob es in anderen Organismen ein Gegenstück gibt, das den Analysen zugänglicher ist. Diese Strategie war jetzt auch bei der Prionenforschung erfolgreich.

Obwohl die Raumstruktur des Erzeugers von Rinderwahn und der neuen Variante des Creutzfeldt-Jacob-Syndroms schon vor Jahren durch kernmagnetische Resonanz in ihren wichtigsten Teilen aufgeklärt wurde, gelten diese Ergebnisse nur für die wasserlösliche und somit harmlose Form. Gefährlich wird das Molekül erst, wenn es sich auf ungewöhnliche Art verknäuelt – oder »faltet«, wie die Biologen sagen – und so genannte Amyloidfibrillen bildet, die auch bei anderen Krankheiten wie dem Alzheimer-Syndrom und dem Altersdiabetes eine verhängnisvolle Rolle spielen.

An den genauen räumlichen Aufbau dieser Fasern und den Mechanismus ihrer Bildung, Vermehrung und Schadwirkung haben sich die Forscher in den vergangenen Jahren trotz intensiver Bemühungen nur ganz langsam herantasten können. So gibt es gleich mehrere Strukturmodelle, die sich mit den Ergebnissen der vielen verschiedenen Untersuchungen in Einklang bringen lassen. Aber welches ist das richtige?

In dieser schwierigen Lage haben sich mehrere Arbeitsgruppe einer zwar medizinisch bedeutungslosen, aber für die Wissenschaft nicht weniger interessanten Gruppe von Prionen zugewandt, die bei Pilzen und insbesondere bei Hefen vorkommt. Als einzellige Lebewesen erkranken diese Organismen zwar nicht an Rinderwahn, auch wenn sie noch so viel Amyloid anreichern. Doch in allen biochemischen und zellbiologischen Einzelheiten verhalten sich Hefeprionen genauso wie die Erreger von BSE. Sie bilden zum Beispiel Amyloidfibrillen, die in dem Sinn ansteckend sind, dass sie ihre eigene Struktur anderen Molekülen aufprägen. Dadurch helfen sie mit, eine in Proteinen statt in DNA codierte Erbinformation weiterzureichen. Diese Eigenschaft ist, wie schon 1994 entdeckt wurde, die Ursache für das Auftreten verschiedener Stämme bei ein und derselben Hefeart.

Die Bierhefe hat zum Beispiel ein Protein namens Sup35, das in löslichem Zustand bei der Beendigung der Proteinbiosynthese hilft. Wenn es sich in Amyloid umwandelt, kann die Synthese bestimmter Proteine sozusagen die rote Ampel überfahren, wodurch andere, längere Versionen der Moleküle entstehen. Wie die Arbeitsgruppe von Susan Lindquist am Whitehead Institute for Biomedical Research in Cambridge (Massachusetts) vor vier Jahren herausfand, scheint diese auf ungewöhnlichem Weg ererbte Umprogrammierung den betreffenden Stämmen zu nützen; denn nur so lässt sich erklären, dass sie in vielen Fällen über Jahrmillionen hinweg erhalten geblieben ist *(Genetics, Bd. 159, S. 527)*.

Durch detaillierte Untersuchungen an Hefeprionen konnten mehrere Arbeitsgruppen jetzt weit gehend aufklären, wie Amyloidfibrillen es schaffen, ihre Raumstruktur an andere Moleküle zu »vererben«. Damit wird auch erstmals verständlich, wie diese infektiösen Proteine trotz identischer Abfolge ihrer Aminosäurebausteine verschiedene Stämme bilden können.

Molekularbiologischer Lattenzaun

Mit verschiedensten Methoden, die nicht jedes einzelne Atom abbilden, aber immerhin die Gestalt der Moleküle grob umreißen können, hatten die Amyloidforscher schon in den 1990er Jahren herausgefunden, dass der Kern der Fibrille aus so genannten Beta-Faltblättern bestehen muss. In diesem Strukturelement, das auch bei normalen Proteinen häufig vorkommt, lagern sich zwei oder mehr Abschnitte der Aminosäurekette parallel nebeneinander, wobei ein ebener, wellblechartiger Bereich entsteht. Die an einem solchen Faltblatt beteiligten Kettenstücke werden in Abbildungen oft durch breite Pfeile symbolisiert.

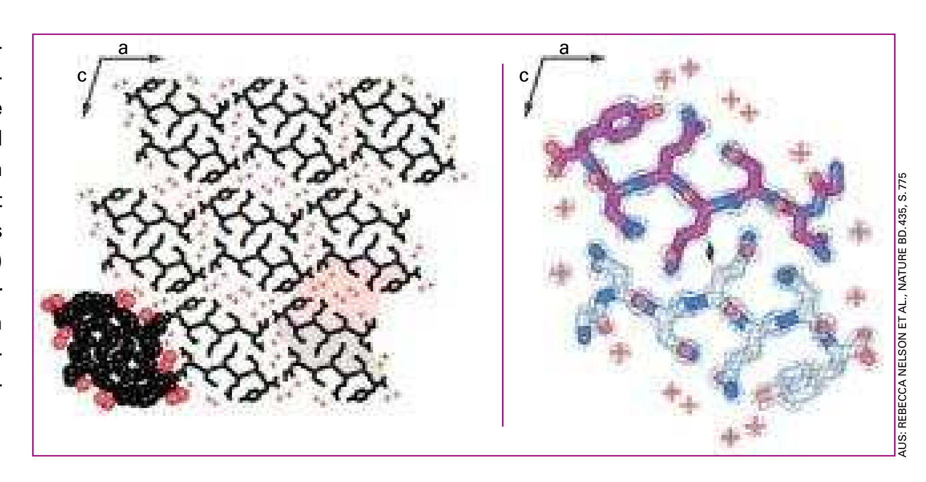
In der Amyloidfibrille verlaufen diese Pfeile quer zur Längsachse der Faser – so wie die Würstchen auf einem Spieß, die Stäbe an einer Antenne oder die Latten an einem Zaun. Die Faser kann im Prinzip unendlich weiterwachsen, indem sie weitere Latten – sprich: Prionproteine – anlagert und dabei das Faltblatt ausdehnt.

Ungeachtet dieser allgemeinen Vorstellungen ist die genaue Struktur der Amyloidfibrillen allerdings bisher nicht bekannt. Hier kam der Proteinkristallograf David Eisenberg nun ein Stück weiter. Mit seiner Arbeitsgruppe an der Universität von Kalifornien in Los Angeles konnte er aus einem kurzen, nur sieben Aminosäure langen Fragment des Hefe- ▷

Sieben Aminosäuren lange Stücke des Hefeprions Sup35 (breite Pfeile) kristallisieren, indem sie sich entlang einer Achse, nämlich b, gleichsinnig aneinander lagern und so »Lattenzäune« hervorbringen. In benachbarten Zäunen – Biologen sprechen von Beta-Faltblättern – sind die Latten entgegengesetzt ausgerichtet. (Weiße/purpurne Kugeln in den Seitenketten symbolisieren Kohlenstoff, rote Sauerstoff und blaue Stickstoff.)

AUS: REBECCA NELSON ET AL., NATURE BD. 435, S. 775

Der Blick von oben auf die (zickzackförmig geknickten) Latten zweier benachbarter Zäune zeigt, wie eng die Seitenketten miteinander verzahnt sind (rechts). Betrachtet man aus derselben Perspektive einen größeren Ausschnitt des Kristalls (links), erkennt man, dass nur immer zwei Beta-Faltblätter (schwarz) so fest zusammenhängen. Ihr schmaler Zwischenraum (grau) kontrastiert zu dem weiten, mit Wassermolekülen (rosa Kreuze) gefüllten Areal (rosa), das solche Doppelblätter voneinander trennt.



AUS: REBECCA NELSON ET AL., NATURE BD. 435, S. 775

prions Sup35 Kristalle herstellen, die in ihren charakteristischen Merkmalen den Amyloidfibrillen entsprechen und demnach vermutlich auf derselben Grundstruktur beruhen. Von ihnen gewannen die Kalifornier durch Röntgenbeugung ein hoch aufgelöstes Durchleuchtungsbild, auf dem erstmals die genaue Anordnung der Atome in dem Beta-Faltblatt des Amyloidkerns sichtbar wird *(Nature, Bd. 435, S. 773)*.

Die Stränge aus sieben Aminosäuren lagern sich dabei parallel und gleichsinnig nebeneinander und bilden so entlang einer kristallografischen Achse ein potenziell endloses Faltblatt (Bild auf S. 14). Dieses hat eine »nasse« und eine »trockene« Oberfläche. Mit der Letzteren lagert es sich mit seinem Nachbarn, dessen Stränge die entgegengesetzte Orientierung aufweisen, zu einem Doppelblatt zusammen, das bemerkenswert dicht gepackt ist und vermutlich der Anordnung der Faltblätter in der Amyloidfaser entspricht.

Die Aminosäure-Seitenketten greifen dabei wie die Zähne eines Reißverschlusses ineinander. Dieser interessante neue Befund könnte die beachtliche Stabilität von Amyloid erklären. Die nasse Außenseite des Doppelpacks ist hingegen relativ weit von derjenigen des benachbarten Paars entfernt, und der Zwischenraum bietet etlichen Wassermolekülen Platz.

Noch detailliertere Einblicke lieferten Untersuchungen, die Rajaraman Krishnan und Lindquist vom Whitehead Institute in Cambridge (Massachusetts) an einem größeren Fragment des Sup35-Prions durchführten. Mit einer Kombination von molekularbiologischen und spektroskopischen Methoden versuchten sie die Bereiche des Prionproteins aufzuspüren, die für seine typischen Eigenschaften verantwortlich sind.

Das gesamte Hefeprion besteht aus drei großen »Domänen«, von denen zwei – N und M genannt – für die Amyloidbildung und Infektiosität sowohl hinreichend als auch notwendig sind. In beiden kommt die Aminosäure Cystein kein einziges Mal vor. Deshalb konnten die Forscher diesen Baustein künstlich einbauen und als Sonde benutzen, um die Rolle der betreffenden Strukturbereiche zu erforschen.

Exzessive Übung in Kombinatorik

In einer monumentalen Fleißarbeit erzeugten Krishnan und Lindquist 37 verschiedene Varianten des NM-Proteins, in denen jeweils eine bestimmte Aminosäure durch Cystein ersetzt war. An diesen Fremdkörper koppelten sie einen Fluoreszenzfarbstoff, der seine Position verriet, und untersuchten eine ganze Reihe von Eigenschaften wie die Lösungsmittelzugänglichkeit und Faltungsgeschwindigkeit an der betreffenden Stelle. Zusätzlich untersuchten sie die Wechselwirkungen zwischen verschieden markierten Molekülen, um die Mechanismen der Zusammenlagerung von Prionen zu Amyloidfibrillen aufzuklären *(Nature Bd. 435, S. 765)*. Bei 37 Varianten waren das sage und schreibe 1369 Kombinationen!

Krishnan und Lindquist fanden auf diese mühsame Weise heraus, dass die Bildung der Fibrillen von einem »geschmolzenen« Zustand des Proteins ausgeht, in dem die Aminosäurestränge keine exakt festgelegte Anordnung haben. Zunächst entsteht ein Keim aus zwei Molekülen, die sich »Kopf an Kopf« zusammenfinden. Später kommen außer weiteren Kopf-Kopf- auch Schwanz-Schwanz-Kontakte hinzu. Die genaue Position all dieser Kontakte ist bei den einzelnen Prionenstämmen unterschiedlich, was deren Spezifität und Vererblichkeit erklärt.

Auf ähnliche Weise hat die Arbeitsgruppe von Roland Riek am Salk-Institut in La Jolla (Kalifornien) durch Einbau von Cystein und Fluoreszenzmarkierungen die Struktur und Funktion eines Prions namens HET-s erforscht, das in dem Schlauchpilz *Podospora anserina* vorkommt. Zusätzlich bediente sich das Team der kernmagnetischen Resonanzspektroskopie, um festzustellen, welche Bausteine an Beta-Faltblattstrukturen beteiligt sind. Dabei identifizierte es vier Proteinabschnitte, die in den Kern der Amyloidfibrille eingebaut werden und für die Prionfunktion unentbehrlich sind *(Nature, Bd. 435, S. 844)*.

Noch vor einem Jahrzehnt waren Hefeprionen nur eine Kuriosität. Mit den Erkenntnissen der letzten Jahre und insbesondere dem jetzigen Durchbruch bei der Erforschung ihrer Struktur-Funktions-Beziehung gehören sie heute zu den wichtigsten Modellsystemen der Amyloidforschung. Mit den neuen Erkenntnissen sollte sich schon bald die Übertragung von Prionenerkrankungen zwischen verschiedenen Arten – etwa der Sprung des BSE-Erregers auf den Menschen – verstehen lassen. Auch für die Entwicklung neuartiger Medikamente gegen Amyloidkrankheiten eröffnen sich neue Ansätze. Wieder einmal hat sich die medizinische Relevanz einer scheinbar nutzlosen Entdeckung erst nach vielen Jahren intensiver Grundlagenforschung erschlossen.

Michael Groß war von 1996 bis 2000 am Oxford Centre for Molecular Sciences an der Amyloidforschung beteiligt und ist jetzt freier Wissenschaftsjournalist und »Science Writer in Residence« am Birkbeck College in London.

PHYSIK

Lichtwelle in Zeitlupe

Diesen Artikel können Sie auch anhören, siehe: www.spektrum.de/audio

Kürzlich ist es gelungen, optische Lichtschwingungen mit extrem kurzen Röntgenblitzen abzutasten und quasi in Zeitlupe aufzulösen. Dieses experimentelle Kunststück bahnt den Weg zur Entwicklung neuartiger Lichtquellen und Syntheseverfahren.

Von Eleftherios Goulielmakis und Ferenc Krausz

Als der britische Physiker James Clerk Maxwell 1864 eine umfassende Theorie für alle elektrischen und magnetischen Phänomene aufstellte, folgerte er, auch Licht sei nichts anderes als eine gekoppelte elektrische und magnetische Welle. Kaum zwanzig Jahre später wies der deutsche Physiker Heinrich Hertz in einer Reihe bahnbrechender Experimente die Existenz solcher elektromagnetischen Wellen im Radiobereich nach und schuf damit die Grundlage für die moderne Nachrichten- und Datentechnik. Die Oszillationen des viel kurzwelligeren sichtbaren Lichts dagegen ließen sich trotz enormer Fortschritte der Messtechnik lange nicht direkt beobachten. Das ist uns erst kürzlich am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching gelungen.

Will man einen dynamischen Vorgang direkt verfolgen, muss das Messgerät über eine entsprechend hohe zeitliche Auflösung verfügen. Beispielsweise genügt die Auflösung eines Stethoskops, um den Herzschlag zu untersuchen, während eine typische Videokamera schon schnellere Abläufe wie die Bewegung eines galoppierenden Pferdes festhalten kann. Moderne Hochgeschwindigkeitskameras schaffen sogar scharfe Schnappschüsse einer Gewehrkugel, die eine Glasscheibe durchschlägt, und ermöglichen so die Rekonstruktion dieses Vorgangs in Zeitlupe. In all diesen Fällen bewegt sich der Kameraverschluss viel schneller als das aufgenommene Objekt.

Verglichen mit der Geschwindigkeit, in der ein Lichtstrahl schwingt, kriecht auch eine Gewehrkugel allerdings im Schneckentempo: Die elektromagnetischen Felder ändern ihre Stärke und Richtung rund tausend Billionen Mal pro Sekunde. Ihre direkte Beobachtung erfordert daher eine zeitliche Auflösung von weniger als einer Femtosekunde, das heißt 10^{-15} Sekunden. Erst vor wenigen Jahren stieß die Experimentiertechnik in solch unvorstellbar kleine Zeitdimensionen vor.

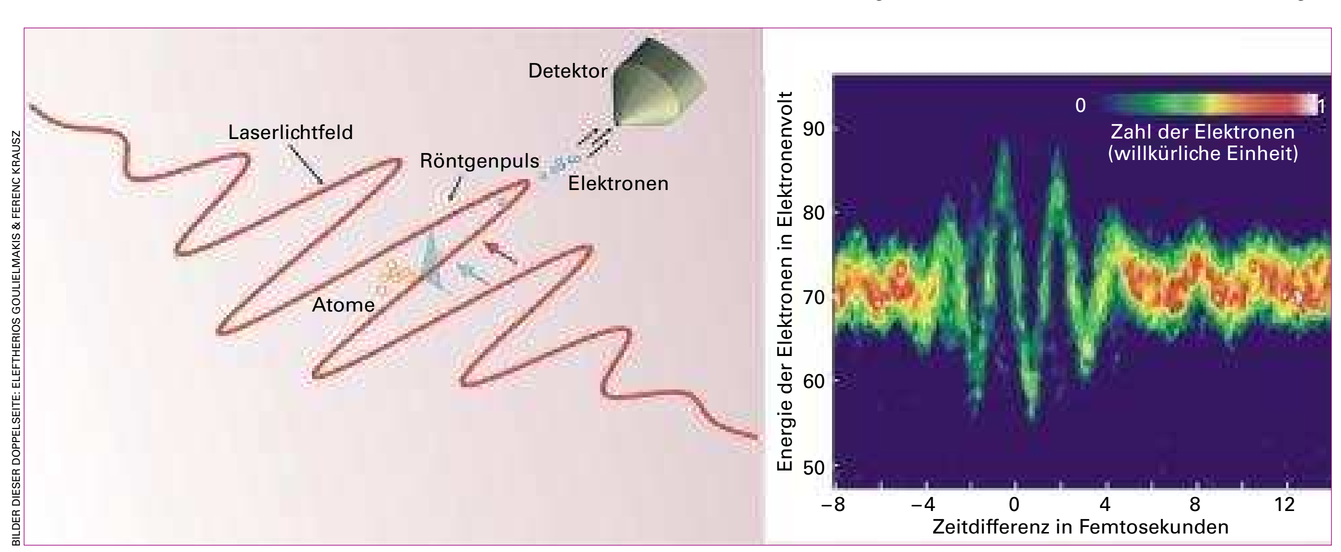
Davor gab es nur Geräte, mit denen sich die Oszillationen von langsamer schwingenden elektromagnetischen Wellen – etwa aus dem Radiobereich – verfolgen lassen. In einem solchen Oszilloskop wird beispielsweise eine über eine Antenne aufgefangene Radiowelle elektronisch verstärkt; anschließend beeinflusst sie mittels eines Kondensators die Bahn eines Elektronenstrahls; dieser trifft schließlich einen phosphoreszierenden Schirm und zeichnet darauf die Form der Welle nach.

Belichtungszeiten von trillionstel Sekunden

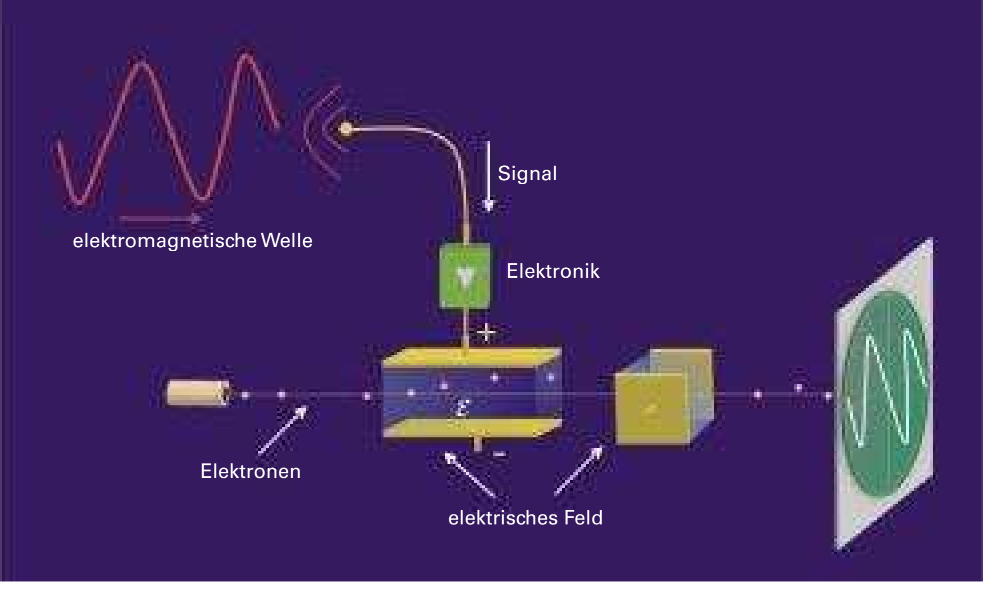
Der im Prinzip einfache und doch raffinierte Apparat – nach seinem Erfinder, dem deutschen Physiker Karl Ferdinand Braun (Nobelpreis 1909), Braun'sche Röhre genannt – wurde rasch zum unverzichtbaren Instrument für die Entwicklung moderner elektronischer Geräte. Heutige Oszilloskope können ohne Weiteres elektrische Signale mit Frequenzen bis zu zehn Gigahertz (10^9 Hertz, das heißt 10^9 Schwingungen pro Sekunde) verfolgen; auf diesen Frequenzen beruht der Mobilfunk. Bei den zehntausendfach schnelleren Schwingungen von sichtbarem Licht versagen sie jedoch. Erst seit wenigen Jahren bietet die so genannte Attosekundenphysik die Möglichkeit, auch solche Oszillationen direkt zu beobachten.

So unglaublich kurz eine Attosekunde (10^{-18} Sekunden) in unseren Augen

Im Licht-Oszilloskop (links) schlägt ein extrem kurzer Röntgenpuls aus Gasatomen in einem Laserlichtfeld Elektronen heraus. Diese haben durch Interaktion mit dem elektrischen Feldvektor je nach dem Zeitpunkt ihrer Freisetzung eine andere Bewegungsenergie. Ein Detektor misst diese Energie. 120 Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten lieferten zusammen ein Bild der zeitlichen Entwicklung der Lichtwellenform (rechts).



BILDER DIESER DOPPELSEITE: ELEFTHERIOS GOULIELMAKIS & FERENC KRAUSZ



erscheint, ist sie für Bewegungen innerhalb eines Atoms ein ebenso natürlicher Maßstab wie die Sekunde für sportliche Wettkämpfe. Im Bohr'schen Modell des Wasserstoffatoms braucht das Elektron rund 150 Attosekunden, um das Proton zu umkreisen. Obgleich dieses halbklassische Planetenmodell bald den exakteren quantenmechanischen Vorstellungen weichen musste, liefert es doch einen korrekten Wert für den Zeitrahmen, in dem die Bewegung der Elektronen in angeregten Atomen typischerweise abläuft. Eine Kamera mit Attosekunden-Belichtungszeit könnte solche inneratomaren Prozesse einfangen und in Zeitlupe wiedergeben. Inzwischen gibt es erste derartige Geräte.

Als Schlüsseltechnologie für ihre Realisierung erwiesen sich ultrakurz gepulste Laser. Sie liefern zeitlich extrem komprimierte Lichtpakete – wie ein Gewitterblitz, der die in einer geladenen Wolke gespeicherte Energie freisetzt, nur milliardenmal schneller. Diese ultrakurzen Laserblitze, die nur wenige Wellenzyklen umfassen und nicht länger als einige Femtosekunden dauern, können bei der Wechselwirkung mit Atomen noch kürzere Röntgenpulse auslösen. Auf diese Weise gelang es uns in unserem Labor vor einem Jahr erstmals, Röntgenblitze zu erzeugen, die schon nach 250 Attosekunden wieder verlöschten (Spektrum der Wissenschaft 6/2004, S. 20). Sie bieten jene ultrakurze Belichtungszeit, die nötig ist, um Schnappschüsse von Elektronen in Atomen und Molekülen aufzunehmen.

Aber nicht nur das. Die Röntgenblitze sind so kurz, dass sich damit sogar Schnappschüsse der Oszillationen von sichtbarer Strahlung – mit Perioden zwischen 1,5 Femtosekunden für blaues und 2,5 für rotes Licht – anfertigen lassen.

▲ Beim herkömmlichen Oszilloskop passiert ein Elektronenstrahl zwei Kondensatoren. Der erste wird durch das Signal gespeist, das eine elektromagnetische Welle in einer Antenne erzeugt, und lenkt den Elektronenstrahl entsprechend nach oben oder unten ab. Der zweite bewirkt durch eine rasch wachsende Spannung eine seitliche Auslenkung. Wenn der Elektronenstrahl dann auf einen leuchtenden Phosphorschirm trifft, zeichnet er dort die Form der Welle nach.

Ein Instrument mit einer »Verschlusszeit« von 250 Attosekunden vermag die Wellenform eines solchen Lichtstrahls aufzuzeichnen, das heißt die Art und Weise, wie das elektrische (und magnetische) Feld darin nach Größe und Richtung zeitlich variiert.

Bildgebung durch Ionisation von Gasatomen

Allerdings können Röntgenpulse diese Feldschwankungen nicht direkt abbilden. Deshalb mussten wir einen Umweg machen, indem wir zunächst Gasatome damit ionisierten. Dabei werden Elektronen freigesetzt – aber nur so lange, wie der Röntgenblitz auf die Atome einwirkt. So entsteht ein 250 Attosekunden langer Puls aus Elektronen. Diese aber reagieren als geladene Teilchen empfindlich auf das elektrische Feld des Lichts: Ihre Bewegungsenergie schwankt proportional zu der Feldstärke, die im Moment ihrer Freisetzung herrscht.

Durch Verzögerung des Röntgenpulses relativ zur Laserlichtwelle lässt sich dieser Moment variieren. Folglich setzt der Attosekundenpuls die Elektronen zu unterschiedlichen Zeitpunkten frei, und deren Energieänderung spiegelt die ▷

jeweils herrschende Lichtfeldstärke wider. Auf diese Weise gelingt es, die Schwankung des elektrischen Felds in Echtzeit darzustellen. Der Apparat fungiert somit als Attosekunden-Oszilloskop, das Signale bis zu Petahertz-Frequenzen (10^{15} Schwingungen pro Sekunde) aufzuzeichnen vermag – was dem sichtbaren und ultravioletten Spektralbereich entspricht.

Durch unsere Versuche konnten wir also endlich nachholen, was seit Maxwells Zeiten ausstand: die direkte Beobachtung der elektromagnetischen Schwingungen von sichtbarem Licht. Natürlich bedurfte es keiner solchen Demonstration mehr, um das Wesen dieser Strahlung aufzuklären. Dennoch gilt in der Physik mit gutem Recht das Prinzip: Kein Phänomen kann als endgültig verstanden gelten, solange es nicht gelungen ist, es in seinem zeitlichen Ablauf direkt zu verfolgen.

Die Hauptbedeutung der Attosekundenphysik liegt jedoch auf einem anderen Gebiet. Wie die Quantentheorie enthüllt hat, ist die Elektronenbewegung in Atomen für so fundamentale Vorgänge wie die Emission von Licht und die Bildung von Molekülen verantwortlich. Wenn es gelingt, sie durch Kräfte zu steuern, die auf wohlkontrollierte Weise rasch variieren, lassen sich Lichtemission und chemische Reaktionen gezielt beeinflussen. Präzise kontrollierte Laserstrahlungsfelder liefern solche Kräfte und eröffnen damit einen Weg, den mikroskopischen Tanz der Elektronen im Atom zu beherrschen. Am Ende könnten neuartige Lichtquellen und bisher ungeahnte Synthesemöglichkeiten stehen.

Eleftherios Goulielmakis und **Ferenc Krausz** forschen am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching.

MEDIZIN

Sechser im Viruslotto

Diesen Artikel können Sie auch anhören, siehe: www.spektrum.de/audio

Was beinahe unmöglich schien, ist endlich gelungen: die Vermehrung des Hepatits-C-Virus in der Kulturschale. Damit schufen Heidelberger Forscher die Voraussetzung für die Entwicklung spezifischer Therapien und Impfstoffe gegen den Leberschädling.

Von Stefanie Reinberger

Lange Zeit war es ein Phantom. Noch in den 1990er Jahren ließ es sich kaum isolieren oder mit dem Elektronenmikroskop abbilden. Vermehrungsversuche im Labor scheiterten allesamt. Manch einer zweifelte sogar an seiner Existenz. Die Rede ist vom Hepatitis-C-Virus, einem Mitglied der Familie der Flaviviridae.

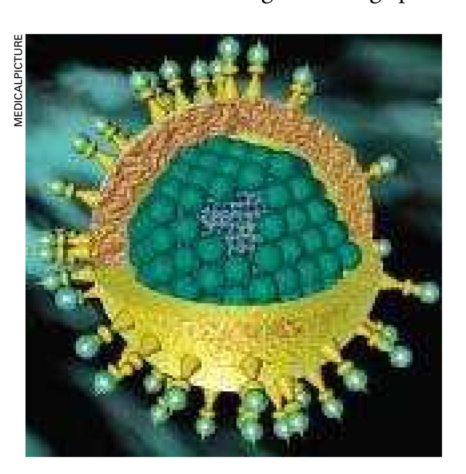
Nach Angaben der WHO sind rund 170 Millionen Menschen – also drei Prozent der Weltbevölkerung – mit dem Erreger infiziert, davon zwei bis fünf Millionen in Europa. Übertragen wird er durch das Blut Infizierter – etwa durch verseuchte Blutkonserven oder Nadelstiche –, aber auch während der Schwangerschaft von der Mutter auf das Kind oder seltener durch Sexualkontakte. Das Virus verursacht Leberentzündungen, die in der akuten Phase meist leicht verlaufen. Bei rund 75 Prozent der Betroffenen kommt es jedoch zu einer chronischen Infektion – mit einer Leberzirrhose und manchmal einem Leberzellkarzinom als Spätfolge.

Einen Impfstoff gegen Hepatitis C gibt es nicht, und auch bei der Entwicklung spezifischer Therapien tappen die Forscher weit gehend im Dunkeln. Der Grund: Ein Erreger, der sich nicht in Zellkultur züchten lässt, macht es den Wissenschaftlern schwer, die Geheimnisse seiner Infektionsstrategie zu enträtseln. Doch das dürfte sich nun ändern; denn Wissenschaftlern in Heidelberg, Tokio und Bethesda (Maryland) ist es erstmals gelungen, das Virus in kultivierten Leberkrebszellen zu vermehren *(Nature Medicine, 7/2005, S. 791)*. Damit bietet sich jetzt die Möglichkeit, den gesamten Infektionszyklus des Erregers zu untersuchen.

Ein gutes Stück hin zu diesem Ziel schaffte der Heidelberger Virologieprofessor Ralf Bartenschlager bereits 1999. Sein Team entwickelte so genannte Replicons. Diese »Miniviren« beherbergen nur einen Teil der genetischen Ausstattung – nämlich den mit den Bauplänen für die Enzyme, die der Erreger zur Vervielfältigung seines Erbguts braucht. Dadurch wurde es immerhin möglich, diesen – fachsprachlich Replikation genannten – Vorgang in der Kulturschale nachzuvollziehen.

Dies war ein bedeutender Fortschritt; denn so gewannen die Forscher erstmals Informationen darüber, welche Faktoren das Virus benötigt, um seine Erbsubstanz, die als ein großes RNA-Molekül vorliegt, in einer Wirtszelle vermehren zu können. Außerdem ließen sich mit dem System mögliche antivirale Substanzen testen: Wenn nach Zugabe eines potenziellen Wirkstoffs keine neuen Replicons mehr entstehen, wurde die Vervielfältigungsmaschinerie des Virus gestört – das Pharmakon ist also ein heißer Kandidat für die Therapie einer Hepatitis-C-Infektion.

Das Replicon-System hat aber auch einen Haken: Es spiegelt nur die Replikation des Erregergenoms wider – komplette Viruspartikel mit Hüllprotein werden nicht gebildet. Um sich in der Kulturschale effektiv vermehren zu können, entwickelten die Miniviren in allen Ver-


MEDICALPICTURE

Wie dieses aufgeschnittene Modell des Hepatitis-C-Virus veranschaulicht, ist dessen RNA-Genom in einer ikosaedrischen Eiweißhülle verpackt, die von einer mit Proteinen bestückten Lipidmembran umschlossen wird.



■ **Tisch-Destille „Destillatore“**

37 cm x 18,5 cm, chrom. Bestell-Nr. 1987.

€ 162,–

Sie können mit dieser schönen Tisch-Destille Ihren eigenen Weinbrand aus Rot- oder Weißwein herstellen. Verwöhnen Sie Ihre Freunde und Bekannte mit einem köstlichen Weinbrand nach „Art des Hauses“.



■ **Sternenhimmel Mini-Leuchtglobus**

Ø 13 cm, die Höhe insgesamt 19 cm, incl. 6V Netzteil, EIN/AUS-Schalter und abnehmbaren Kabel. Bestell-Nr. 1913. **€ 14,80**

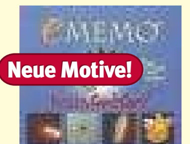
Der kleinste beleuchtete Zweibild-Globus der Welt! Verschönern Sie Ihren Schreibtisch mit diesem Leuchtglobus. Die Fixsterne leuchten besonders stark, der Metallmeridian ist silber.



■ **Die Mathematik-Uhr**

Gehäusegröße Ø 36 mm, garantiert Nickel u. PCP-frei u. wasserdicht. Original Schweizer WMC©-geprüftes Miyota-Quarz-Markenuhrwerk, schw. Leder-Armband, lebenslange Garantie, in eleganter Metall-Präsentbox. Bestell-Nr. 1770. **€ 74,90**

Eine elegante Titan-Herrenuhr in mathematischem Design. Das Ziffernblatt zeigt statt der herkömmlichen Zahlen mathematische Symbole, die in einem Beipackzettel leicht verständlich beschrieben und erklärt werden.
Ebenfalls lieferbar als Damenuhr *Ø 32 mm. Bestell-Nr. 1798.* **€ 74,90**



■ **Braintwister – Das Memo-Spiel mit den 2 Seiten**

Bestell-Nr. 1678. **€ 15,–**

Ab 8 Jahren. Testen und trainieren Sie Ihr Gedächtnis und Ihre Kombinationsgabe. 90 Spielkarten sind sowohl auf der Vorder- als auch auf der Rückseite mit zehn Wissenschaftsmotiven bedruckt. Zwei Karten sind ein Paar, wenn beide Abbildungen – Vorder- und Rückseite – übereinstimmen. **Doppelte Herausforderung, doppelter Spaß! Memory für Fortgeschrittene!**



■ **Pen Ultimate**

Bestell-Nr. 1667. **€ 12,70**

Der schwebende Pen Ultimate ist ein Blickfang für Ihren Schreibtisch. Der Kugelschreiber schwebt in einer speziellen Halterung und kann um die Längsachse in Rotation gebracht werden.



■ **MR-999E Movit Roboterarm**

Technische Daten: max. Höhe: 510 mm, max. Breite: 360 mm, Gewicht: 1050 g, max. Hebegewicht: 130 g, Benötigte Batterien: 4 Mono-Zellen (nicht enthalten), AREXX. Bestell-Nr. 1956. **€ 89,95**

Mit diesem Roboterarm erleben Sie die vielfältigen Bewegungs- und Einsatzmöglichkeiten moderner Industrieroboter. Alle Funktionen wie z. B. Greifen, Loslassen, Heben, 360s Armdrehung, Gelenk- und Achsendrehung können absolut vorbildgetreu realisiert werden. Dabei hebt und bewegt der Roboterarm Lasten von bis zu 130 g millimetergenau. Unterschiedliche Glühlampen in dem transparenten Gehäuse signalisieren, welcher Aktor (Motor) im Moment gerade aktiv ist. Der Roboter wird als Bausatz geliefert und muss selbst zusammengebaut werden. Das Handbuch ist sehr detailliert und erklärt neben der Konstruktion des Roboterarms auch die Funktion der Mechanik.

Mit dem separat erhältlichen PC Interface steigen Sie ausserdem in die Programmierung von Robotern dieser Art ein:

■ **MRAI-999HB PC Controller**

Das PC Interface zum Roboterarm Movit MR-999 AREXX. Bestell-Nr. 1959. **€ 79,95**

Mit dieser Software kann man den Roboterarm sowohl direkt vom PC aus steuern, als auch selbst mit dem PC programmieren. Es gibt einen vorprogrammierten Demo-Mode, sodass Anfänger Schritt-für-Schritt das Programmieren erlernen können. Weiterhin kann man eigene Programme schreiben, mittels einer einfachen, BASIC-ähnlichen Programmiersprache. Die Software ist geeignet für alle Windows-Versionen. Geeignet für Pentium PC ab 100 MHz, 16 MB RAM.

Portofreie Lieferung in D & A ab einem Bestellwert von € 20,–*



■ **IRONPOWER – Der Powerball aus Metall**

Gewicht: ca. 300 g, Ø ca. 7 cm, Farbe: silber matt eloxiert, Rotor silber, in Metallbox (9 cm x 9 cm x 8 cm). Bestell-Nr. 1845.

€ 49,90

Der **Ironpower** vereint die physikalischen Kräfte des Gyroskops mit dauerhaftestem Material, höchster Präzision und edelster Optik. Das Training steigert Muskelkondition, Greifkraft, Koordination und Durchblutung und beugt so auch Verspannungen vor. Und so funktionierts: Im **Ironpower** befindet sich ein ca. 200 g schwerer Rotor, der vom Benutzer durch Kreisbewegungen auf Touren gebracht wird. Dabei entsteht ein Drehimpuls um die Achse und es baut sich Stabilität auf, die durch das Trägheitsmoment sowie die Geschwindigkeit der Rotation verursacht wird.

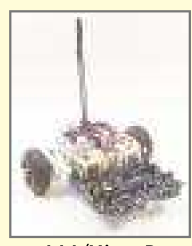


■ **Design-Wetterstation „Meso“**

Für Innen, Größe: 30 cm x 22 cm x 4,3 cm, MDF, Frontplatte Metall geschliffen und zaponiert. Bestell-Nr. 1988.

€ 122,–

Elegante Design-Wetterstation für den Innenraum, bestehend aus Barometer, Thermometer und Hygrometer. Mit dieser Wetterstation haben Sie das Klima in Ihren Räumen unter Kontrolle.



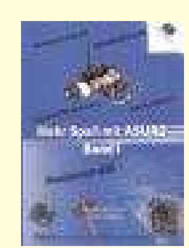
■ **ARX-03 ASURO Roboter-Bausatz**

Bausatz für einen autonomen multisensoriellen Roboter

Licence DLR, LxHxH: ca. 117x122x45 mm, Gewicht ca. 165 g (incl. Akkus oder Batterien), mit ausführlicher Anleitung. Stromversorgung: 4 x AAA/Micro-Batterien oder Akkus (nicht enthalten). Bestell-Nr. 1891. **€ 49,95**

ASURO ist ein am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt entwickelter Bausatz (Löten erforderlich) für einen autonomen multisensoriellen Roboter. Neben sechs Kollisionstastern und einer optischen Einheit zur Verfolgung einer Linie verfügt ASURO über zwei Odometer und einige Anzeigeelemente. Die mitgelieferte Duplex-Infrarotschnittstelle erlaubt die drahtlose Programmierung, wie auch eine Fernsteuerung mit dem PC. Das „Gehirn“ des Roboters ist ein RISC-Prozessor, der auch die Abarbeitung komplexer Programme ermöglicht. Die Programmierung erfolgt in C.

Ebenfalls lieferbar:



Robin Gruber, Jan Grewe

■ **Mehr Spaß mit Asuro Band 1**

2005, 118 Seiten, kart., Arexx. Bestell-Nr. 1951. **€ 14,90**

Das Begleitbuch zum Roboter-Bausatz ASURO: mit Grundlagen, nützlichen Tipps und einer Erweiterungsplatine.



■ **Sanduhr Paradox**

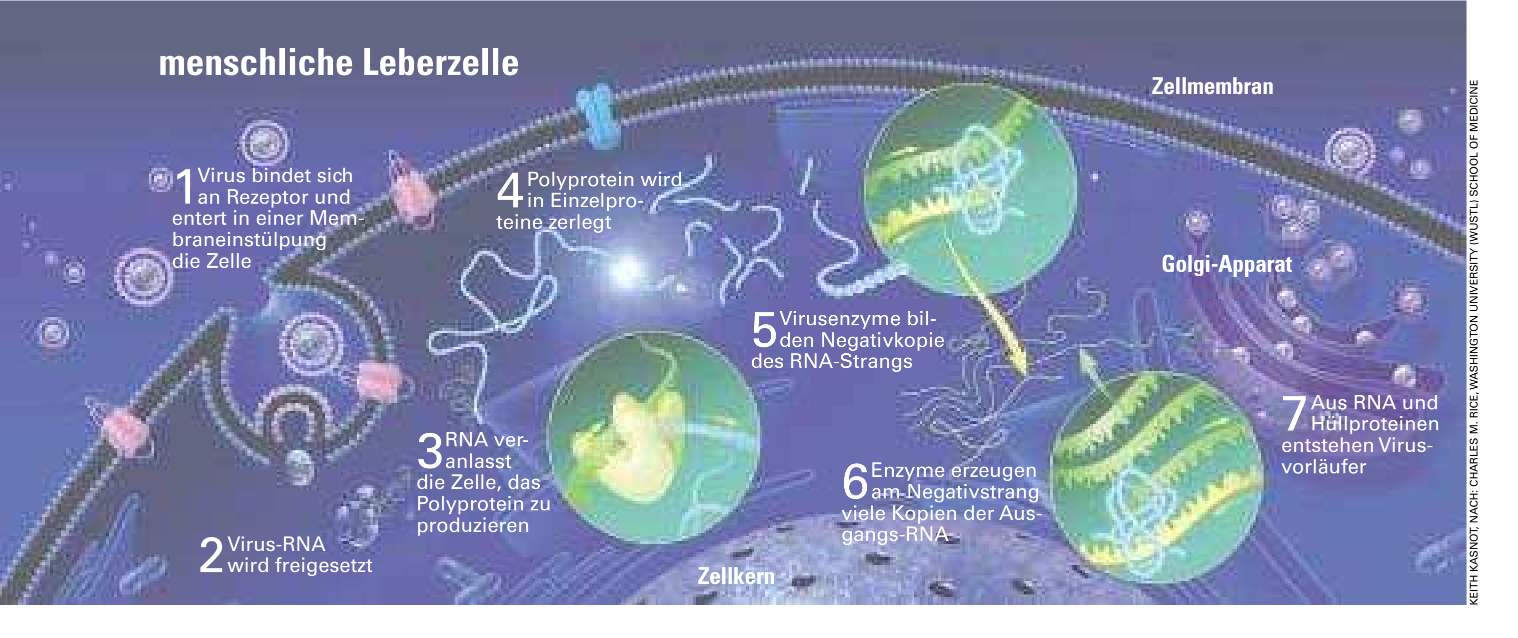
Bestell-Nr. 1666. **€ 14,80**

Stellen Sie die Zeit auf den Kopf! Da das spezifische Gewicht des Kunstsandes niedriger ist als das der öligen Flüssigkeit, läuft er in der **Sanduhr Paradox** von unten nach oben!

Weitere interessante Titel finden Sie im Internet unter:
www.science-shop.de
Besuchen Sie uns!

Bequem bestellen: ➜ direkt bei www.science-shop.de ➜ per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de ➜ telefonisch 06221/9126-841 ➜ per Fax: 0711/7252-366 ➜ per Post: Postfach 810680 • 70523 Stuttgart

* Bei Bestellungen in Deutschland & Österreich unter € 20,– sowie bei Bestellungen im sonst. Ausland berechnen wir € 3,50. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt.



▲ **In den Grundzügen folgt der Infektionszyklus des Hepatitis-C-Virus dem hier gezeigten Schema. Nachdem es nun erstmals gelungen ist, den Erreger in Zellkultur zu vermehren, werden sich die Details sehr viel genauer erforschen lassen.**

▷ suchen schnell Mutationen. Genau diese verhindern aber – auf das vollständige Genom übertragen –, dass nach der Vermehrung des Erbguts auch neue Erreger entstehen. Aus bislang ungeklärten Gründen ist das Zusammensetzen der Einzelteile zu einem kompletten Virusteilchen gestört. »Und da biss sich die Katze dann in den Schwanz«, erinnert sich Bartenschlager. »Mit den Mutationen konnten wir keine Viren herstellen und ohne sie kam es nicht einmal zu einer ausreichenden Vervielfältigung des Genoms.«

Meilenstein der Hepatitis-Forschung

Wie dieses Problem zu lösen sei, vermochte niemand zu sagen. Doch dann wurde der Heidelberger Virologe auf die Arbeiten seines japanischen Kollegen Takaji Wakita vom Metropolitan Institute of Neuroscience in Tokio aufmerksam. Dieser hatte aus einem Virus, das von einem Patienten mit einer fulminanten, also schwer verlaufenden Hepatitis stammte, ebenfalls ein Replicon hergestellt und es in Kultur mit der menschlichen Leberkrebszelllinie Huh7 vermehrt. Das Erstaunliche war, dass das Minivirus nicht in der sonst üblichen Weise mutierte und sich trotzdem sehr effektiv vervielfältigte. »Dieses Virus unter all den vielen Erregervarianten zu finden, war wie ein Sechser im Lotto«, erklärt Bartenschlager. »Uns war schnell klar: Das ist es, mit diesem Isolat muss auch ein vollständiger Infektionszyklus in der Kulturschale möglich sein.«

Allerdings hatte Wakita nicht das Virus selbst, sondern nur dessen RNA aus dem Blut des Patienten isoliert und sie, um sie zu vermehren, nach dem üblichen Verfahren in DNA umgeschrieben. Die so erstellte »cDNA-Bibliothek« stand auch den Heidelberger Forschern zur Verfügung. Bartenschlager und sein Mitarbeiter Thomas Pietschmann rekonstruierten daraus die Original-RNA und schleusten sie in Huh7-Zellen ein. Tatsächlich entdeckten sie 72 Stunden später im Kulturmedium frisch gebildete Viruspartikel. Demnach hatte sich die RNA nicht nur selbst kopiert, sondern es waren auch die Hüllproteine gebildet und alles fein säuberlich zu »Paketen« zusammengefügt worden.

Handelte es sich dabei wirklich um voll funktionsfähige, infektiöse Viren? Um das zu prüfen, gaben die Wissenschaftler die Partikel in Kulturschalen mit normalen Huh7-Zellen – und erhielten eine neue Erregergeneration. »Damit ist es uns zum ersten Mal überhaupt gelungen, den vollständigen Vermehrungszyklus des Hepatitis-C-Virus im Labor zu beobachten«, unterstreicht Bartenschlager die Bedeutung dieses Experiments.

Doch eine Frage blieb: Könnte es sein, dass sich das japanische Virus mit der Bezeichnung JFH1 (vom englischen *Japanese Fulminant Hepatitis*) speziell an diese Leberkrebszellen angepasst hat und sich ausschließlich darin vermehren kann? Das würde bedeuten, dass es sich nicht um eine echte Hepatitis-C-Infektion handelt. Mit diesem Zweifel räumte Kooperationspartner Jake Liang vom National Institute of Health in Bethesda auf. Der amerikanische Mediziner spritzte einem Schimpansen – der einzigen bekannten Tierart, die sich zuverlässig und reproduzierbar mit Hepatitis C infizieren lässt – die Erreger aus der Zellkultur und beobachtete eine Infektion des Affen. Damit steht die Echtheit der in Zellkultur gezüchteten JFH1-Viren außer Frage.

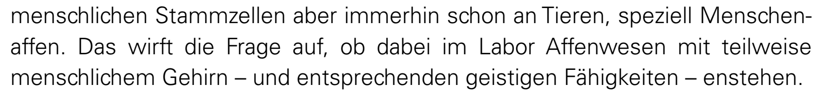
»Die Vermehrung des Virus im Labor ist ein Meilenstein für die Hepatitis-C-Forschung«, betont Bartenschlager. »So wird es uns endlich möglich, die verschiedenen Schritte im Lebenszyklus, wie den Eintritt in die Wirtszelle oder den Zusammenbau der Partikel, zu untersuchen und das Virus besser kennen zu lernen.« Dieses Wissen führt möglicherweise zu neuen Therapieansätzen, die an anderer Stelle als dem Vermehrungsschritt angreifen.

Außerdem könnte das Zellkultursystem den Weg zu einem Impfstoff ebnen. Zwar tritt das Lebervirus in unzähligen Varianten auf, sodass etwa das Injizieren einer unschädlich gemachten Form des JFH1 mit Sicherheit keinen generellen Schutz vor einer Infektion mit Hepatitis C bieten könnte. Doch die Heidelberger Forscher haben schon begonnen, so genannte chimäre Viren herzustellen, die zwar die Replikationsenzyme von JFH1 besitzen, deren Hüllproteine jedoch von anderen Isolaten stammen. Damit wollen sie die Infektionseigenschaften weiterer Erregerstämme untersuchen. »Und«, so Bartenschlager, »es wäre durchaus denkbar, dass uns diese Chimären eines Tages zu einem Impfstoff führen, der – ähnlich wie die Vakzinen gegen Influenza oder Dengue-Fieber – die Antigene verschiedener gängiger Typen kombiniert.«

Stefanie Reinberger ist promovierte Biologin mit Schwerpunkt Virologie und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

Springers EINWÜRFE

von Michael Springer



Affen mit Menschenhirn

Kafkaesker Albtraum oder schöne neue Tierwelt?

Als Mittel gegen schwere neurologische Erkrankungen mit Namen wie Alzheimer, Huntington oder Parkinson wird seit einigen Jahren die Möglichkeit einer Art Frischzellentherapie erforscht: Man hofft, das geschädigte Nervensystem durch Transplantation neuronaler Stammzellen ganz oder teilweise reparieren zu können. Das ist zwar noch ferne, leise Zukunftsmusik. Erprobt wird die »Pfropfung« des Gehirns mit menschlichen Stammzellen aber immerhin schon an Tieren, speziell Menschenaffen. Das wirft die Frage auf, ob dabei im Labor Affenwesen mit teilweise menschlichem Gehirn – und entsprechenden geistigen Fähigkeiten – enstehen.

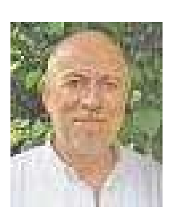
Tatsächlich lotet eine interdisziplinäre Arbeitsgruppe um die Bioethikerin Ruth Faden von der Johns Hopkins University in Baltimore (Maryland) die moralische Seite dieser Möglichkeit bereits seit einem Jahr gründlich aus *(Science, Bd. 309, S. 385)*. Im Kern geht es um den Streitpunkt: Ist ein Tierversuch ethisch zulässig, wenn das Versuchsobjekt dabei am Ende kognitive Fähigkeiten erwirbt, über die es natürlicherweise nicht verfügt? Zwar verhalten sich auch Schimpansen, die von Menschen aufgezogen werden, menschenähnlicher als in freier Wildbahn – aber eben nur bis zu einer Grenze, die ihnen ihr Gehirn setzt.

Das wiederum provoziert die kecke Frage: Bedeutet die neuronale Aufrüstung für das Tier nicht sogar einen Gewinn, wenn es dadurch Zugang zu Fertigkeiten bekommt, wie wir sie an unseresgleichen hoch schätzen? Wer von uns ist nicht froh darüber, ein Mensch und kein Affe zu sein? Gegenfrage: Bringen Geistesgaben, welche die von Tieren übersteigen, nicht auch größere Leidensfähigkeit mit sich? Wer möchte als Fastmensch in der Haut eines Versuchstiers stecken?

Gegen solche je nach Standpunkt gruseligen oder faszinierenden Überlegungen bringen Wissenschaftler gern zwei Argumente vor, die einander im Grunde ausschließen: Zum einen seien die neuen Methoden gar nicht so neu, es gebe beispielsweise längst Transplantationen über Artengrenzen hinweg. Zum anderen stünden die Methoden wiederum noch so am Anfang, dass sie erst in ganz ferner Zukunft moralische Probleme aufwürfen, wenn überhaupt.

Die US-Ethikgruppe empfiehlt jedenfalls nach reiflicher Erwägung, zumindest das Einpfropfen großer Mengen menschlicher neuronaler Stammzellen in das unreife Gehirn von un- oder neugeborenen Menschenaffen entweder ganz zu verbieten oder nur ausnahmsweise zu erlauben, denn dabei sei die Möglichkeit bleibender Veränderungen am größten. Nur: Was dem Ethiker ein moralisch bedenkliches Risiko, ist dem Forscher eine spannende Chance.

Fast ein Jahrhundert bevor derlei als entfernte technische Möglichkeit überhaupt vorstellbar werden konnte, malte der Schriftsteller Franz Kafka bereits die fiktive Innenansicht eines solchen Zwischenwesens aus. In »Ein Bericht für eine Akademie« erzählt ein sprachbegabter Affenmensch, wie er als Tier eingefangen und zum Menschen zugerichtet wurde. Der souveräne Vortrag endet: »Komme ich spät nachts von Banketten, aus wissenschaftlichen Gesellschaften, aus gemütlichem Beisammensein nach Hause, erwartet mich eine kleine halbdressierte Schimpansin und ich lasse es mir nach Affenart bei ihr wohlergehen. Bei Tag will ich sie nicht sehen; sie hat nämlich den Irrsinn des verwirrten dressierten Tieres im Blick; das erkenne nur ich und ich kann es nicht ertragen. – Im Ganzen habe ich jedenfalls erreicht, was ich erreichen wollte. Man sage nicht, es wäre der Mühe nicht wert gewesen.«



Übergewicht überbewertet?

Eine wachsende Zahl von US-Wissenschaftlern wirft Gesundheitsbehörden, prominenten Experten und Medien vor, irreführende Informationen über gesundheitliche Konsequenzen steigenden Übergewichts zu verbreiten.

Diesen Artikel können Sie auch anhören, siehe: www.spektrum.de/audio

Von W. Wayt Gibbs

Zu viel Speck ist ungesund – so das Kredo seit Jahren. In die Kategorie »zu dick« fallen inzwischen immerhin etwa 60 Prozent der Erwachsenen in den USA und rund 50 Prozent in Deutschland. Könnte es aber sein, dass Dicksein an sich kein ernstes Gesundheitsrisiko darstellt, zumindest für die meisten der übergewichtigen oder gar fettleibigen Menschen? Schadet es womöglich mehr, als es nützt, alle bloß Übergewichtigen bis leicht Adipösen zum Abnehmen zu drängen?

Solche Thesen kollidieren mit Schätzungen, wonach mehr als 300 000 US-Bürger jährlich vorzeitig an den Folgen ihrer extremen Leibesfülle sterben. Ebenso widersprechen sie der Auffassung, infolge der zunehmenden Verfettung ganzer Nationen seit den 1980er Jahren würde dort eine Fülle medizinischer Probleme – darunter Diabetes, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Krebs – epidemische Ausmaße annehmen. Erst im März 2005 erschien in der Fachzeitschrift »New England Journal of Medicine« ein Spezialbeitrag, der solche Befürchtungen scheinbar bestätigte. Unter Federführung von S. Jay Olshansky von der Universität von Illinois in Chicago schätzte das zehnköpfige Autorenteam, dass auf Grund der Adipositas-Epidemie in den USA »der stetige Anstieg der Lebenserwartung, der in den letzten beiden Jahrhunderten zu beobachten war, möglicherweise bald zum Stillstand kommt«. Viele Medien, auch außerhalb der USA, griffen das Thema und insbesondere die Warnung auf, angesichts der Trends könne die Fettleibigkeit in den kommenden Jahrzehnten die Lebenserwartung voraussichtlich um bis zu fünf Jahre mindern.

Eine steigende Zahl von Akademikern hält allerdings Vertretern der Fachwelt, Gesundheitsbehörden und Medien vor, sie stellten die gesundheitlichen Konsequenzen der »Übergewichts- und Fettleibigkeitsepidemie« übertrieben dar. (Um Verwechslungen vorzubeugen: Übergewicht im medizinischen Sinne ist eine Vorstufe zur Fettleibigkeit, kein Oberbegriff für alles.) Solche Anschuldigungen werden unter anderem in einer Reihe neu erschienener Bücher erhoben, deren Verfasser an nichtmedizinischen öffentlichen Forschungsinstitutionen arbeiten. Diese Kritiker bestreiten nicht, dass sich der Anteil Fettleibiger in den USA und weiten Teilen Europas seit 1980 etwa verdoppelt hat. Sie geben auch zu, dass die Adipositas, vor allem in ihrer extremen Form, durchaus ein Risikofaktor für bestimmte Erkrankungen und vorzeitigen Tod zu sein scheint. Die Warnungen der Experten, Übergewicht und Adipositas würden eine massive, sich verschlimmernde Gesundheitskrise heraufbeschwören, halten sie aber für weit überzogen.

IN KÜRZE

- Dicksein gilt als wichtige Ursache chronischer Erkrankungen, sodass angesichts der **epidemisch anwachsenden Fettleibigkeit** in verschiedenen Industriestaaten eine schwere Gesundheitskrise befürchtet wird.
- Einige kritische Stimmen argumentieren, dass die **Konsequenzen dieses Trends** durchaus nicht so klar sind – und ziemlich sicher weniger gravierend, als es von Adipositas-Experten, Gesundheitsstellen und Medien gewöhnlich dargestellt wird.

Schlimmer als die Pest

Zum Beispiel verwerfen sie spöttisch eine Äußerung von Julie L. Gerberding, Direktorin der Centers of Disease Control and Prevention (CDC) in Atlanta. 2003 erklärte sie, dass »keine Epidemie – sei es die Grippe oder die mittelalterliche Pest – so gravierende gesundheitliche Konsequenzen für unser Land und unsere Gesellschaft haben wird wie die Adipositas-Epidemie«. (Die verheerende Grippepandemie zwischen 1918 und 1919 forderte weltweit 40 Millionen Todesopfer, darunter 675 000 Amerikaner.)

In Wirklichkeit sei etwas anderes geschehen, behauptet Eric Oliver, Politologe an der Universität Chicago. Von ihm erschien jüngst das Buch »Obesity. The Making of an American Epidemic«. »Eine relativ kleine Gruppe von Wissenschaftlern und Medizinern, wovon viele ▷



Nach Analysen neuerer Daten droht nicht jedes Zuviel an Gewicht das Leben zu verkürzen.

HUGH KRETSCHMER

unmittelbar finanziell von der ›Abnehmindustrie‹ unterstützt werden, hat eine willkürliche, unwissenschaftliche Definition für Übergewicht und Adipositas geschaffen. Sie haben die Ansprüche hochgetrieben, Statistiken über die Folgen unserer Gewichtszunahme verzerrt und dabei die komplexen gesundheitlichen Fakten um das Dicksein weit gehend ignoriert.«

Paul Campos, Professor für Jura an der Universität von Colorado in Boulder, unterstreicht Letzteres mit einem Beispiel. Es gebe weithin akzeptierte Belege, dass 50 bis 80 Prozent der Variation beim Fettansatz in einer Population durch genetische Unterschiede zu erklären seien. Da keine der Methoden, die unbedenklich und auf breiter Basis praktikabel seien, langfristig das Gewicht um mehr als fünf Prozent reduziere, »ist der offizielle Rat, den Körper-Masse-Index (Body-Mass-Index) im ›gesunden Bereich‹ zu halten, für viele Menschen schlicht und einfach unmöglich zu befolgen«. Dieser Index – bekannt unter dem allgemein gebräuchlichen englischen Kürzel BMI – errechnet sich aus dem Körpergewicht in Kilogramm geteilt durch das Quadrat der Körpergröße in Metern. Anhand dieses Werts wurden die Gewichtsklassen definiert (siehe Kasten rechte Seite unten).

Beide Kritiker behaupten, die Weltgesundheitsorganisation WHO sowie nationale Gesundheitsbehörden und Gesundheitsministerien stigmatisierten unbeabsichtigt einen großen Teil der Bevölkerung noch mehr, indem sie sowohl die Risiken des Dickseins als auch die Machbarkeit des Abnehmens übertrieben darstellten. Zugleich fördere dies ungewollt das Ausprobieren von unausgewogenen Diäten und am Ende – durch den so genannten Jojo-Effekt – vielleicht sogar weiteren Gewichtszuwachs. »Die größte Ironie ist, dass man hier womöglich eine Krankheit erst schafft, indem man sie als solche bezeichnet«, bemerkt Campos.

Derartige Argumente mögen zunächst abwegig erscheinen. »Wer sich die Fachliteratur genau anschaut und dennoch glaubt, Fettleibigkeit sei nicht schlecht, muss auf einem anderen Planeten leben«, meint James O. Hill, Adipositas-Forscher am Zentrum für Medizinische Wissenschaften der Universität von Colorado in Boulder. Laut den jüngsten Ernährungsrichtlinien des US-Gesundheits- und des Landwirtschaftsministeriums vom Januar 2005 ist »der hohe Anteil von Übergewicht und Adipositas hinsichtlich der öffentlichen Gesundheit sehr Besorgnis erregend, da überschüssiges Körperfett das Risiko erhöht für frühzeitigen Tod, Typ-2-Diabetes, Bluthochdruck, schlechte Blutfettwerte, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Schlaganfälle, Erkrankungen der Gallenblase, Störungen der Atemfunktion, Gicht, Arthrosen und bestimmte Arten von Krebs«. Die klaren Schlussfolgerungen lauten: Jegliches Zuviel an Gewicht ist gefährlich, und ein hoher BMI ist die Ursache und nicht nur ein Indikator für ein erhöhtes Gesundheitsrisiko.

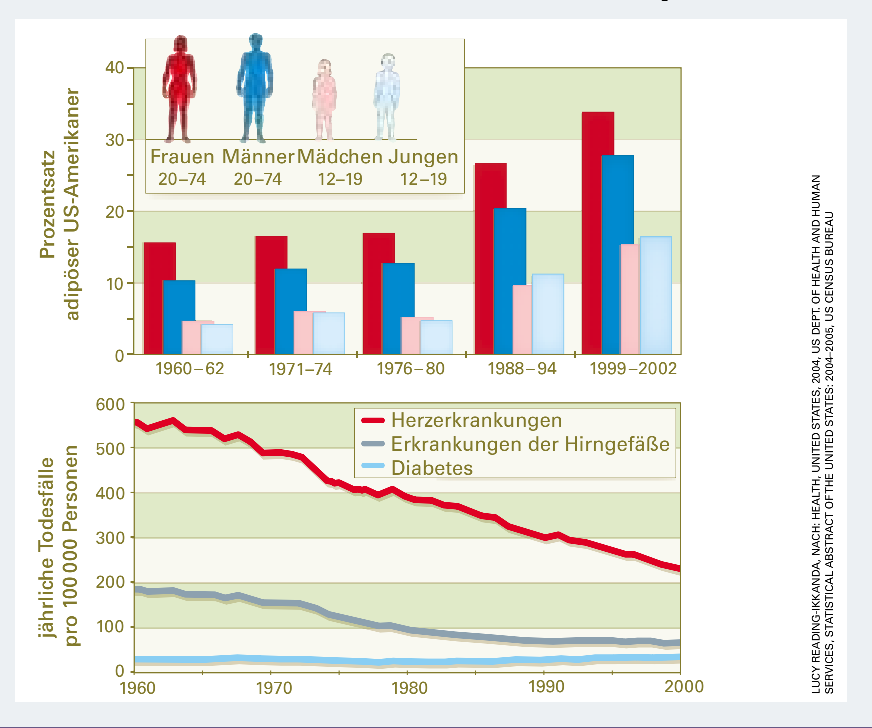
Übergewicht sogar günstiger?

»Diese angenommenen gesundheitlich schädlichen Folgen von ›Übergewicht‹ sind nicht nur übertrieben, sondern meistenteils fabriziert« – so Campos. Und tatsächlich deutet eine genauere Betrachtung neuerer epidemiologischer und klinischer Studien darauf hin, dass an der Kritik etwas dran sein könnte, wenn auch manche Anschuldigung wohl übertrieben ist.

Oliver beispielsweise verweist auf eine ungewöhnlich gründliche Neuanalyse der Daten dreier repräsentativer nationaler Beobachtungsstudien in den USA; diese fand nur eine minimal und statistisch nicht signifikant erhöhte Sterblichkeit der leicht adipösen Personen – verglichen mit »normalgewichtigen« Teilnehmern. Dabei wurden die Effekte anderer Einflussfaktoren wie Alter, ethnische Zugehörigkeit, Geschlecht sowie Nikotin- und Alkoholkonsum herausgefiltert. Bei den drei Erhebungen handelt es sich um die National Health and Nutrition Examination Surveys I bis III (NHANES I bis III). Diese US-Gesundheits- und Ernährungsstudien, jeweils aus den frühen beziehungsweise späten 1970er sowie den frühen 1990er Jahren, haben die Analytiker mit den Sterberegistern neun bis 19 Jahre später abgeglichen. Wie Ergebnisse nun zeigen, besitzen übergewichtige erwachsene US-Amerikaner (BMI 25 bis 29,9) sehr wahrscheinlich sogar ein geringeres Risiko, vorzeitig zu sterben, als die Gruppe mit dem als gesund angesehenen Nor-

Adipositas in der Presse

Der Anteil fettleibiger US-Bürger hat sich bei Erwachsenen seit 1980 verdoppelt, bei Jugendlichen verdreifacht (obere Grafik). Zwar nahm Diabetes als Todesursache geringfügig zu, die Mortalitätsrate von Herzerkrankungen und Schlaganfällen ist jedoch, anders als vorhergesagt, gesunken (untere Grafik). Die Rate wird altersbereinigt und standardisiert, sodass die sich verändernde Altersstruktur herausgefiltert ist.



LUCY READING-IKKANDA, NACH: HEALTH, UNITED STATES, 2004, US DEPT. OF HEALTH AND HUMAN SERVICES, STATISTICAL ABSTRACT OF THE UNITED STATES: 2004–2005, US CENSUS BUREAU

malgewicht (BMI 18,5 bis 24,9). Dies bedeutet, dass das übergewichtige Segment der »Übergewichts- und Adipositas-Epidemie« wahrscheinlich eher zur Reduktion der Todesraten beiträgt als zur Steigerung. »Zu dieser Kategorie gehören aber die meisten Amerikaner, die zu viel auf die Waage bringen«, betont Campos.

Entgegen den Erwartungen ist »Untergewicht, das allerdings nur einen kleinen Teil der Bevölkerung betrifft, sogar mit mehr zusätzlichen Todesfällen assoziiert als die Adipositas vom Grad I (BMI 30 bis 34,9)«, erklärt Katherine M. Flegal, Wissenschaftlerin an den CDC. Sie leitete die Studie, die am 20. April im angesehenen »Journal of the American Medical Association« erschien. Zuvor hatten Wissenschaftler der CDC, des Nationalen Krebsinstituts in Bethesda (Maryland) sowie unabhängige, von der Zeitschrift beauftragte Experten das Ganze monatelang auf Stichhaltigkeit geprüft.

Diese neuen Resultate widersprechen zwei zuvor veröffentlichten Abschätzungen, auf denen die häufig wiederholte Behauptung fußt, Adipositas sei schuld am vorzeitigen Tod von jährlich mindestens 300 000 Menschen allein in den USA. Es besteht jedoch der wohlbegründete Verdacht, dass diese beiden früheren Schätzungen an zweifelhaften Annahmen, statistischen Fehlern und veralteten Messwerten kranken (siehe Kasten S. 28).

Betrachteten Flegal und ihre Mitarbeiter NHANES III allein – die aktuellste Erhebung, die Körpergröße und Gewicht von 1988 bis 1994 sowie Sterbedaten bis 2000 erfasste –, fand sich selbst für hochgradige Fettleibigkeit kein statistisch signifikantes höheres Sterberisiko. Woran liegt das? Flegal vermutet, die Verbesserung der medizinischen Versorgung in den letzten Jahrzehnten habe das Mortalitätsrisiko, das sonst mit Adipositas einhergeht, gesenkt. Für diese Hypothese spreche sowohl der ungebrochene Anstieg der Lebenserwartung als auch der stete Rückgang von Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Schlaganfällen als Todesursache in eben den letzten 25 Jahren, in denen der Prozentsatz Adipöser stark gewachsen ist (siehe Kasten links).

Doch wie steht es um den künftigen Tribut einer um zwei bis fünf Jahre reduzierten Lebenserwartung, vor der Olshansky und David B. Allison, einer der Koautoren, so eindringlich warnen? »Uns ging es nur um eine grobe plausible Abschätzung«, verteidigt sich Allison



auf Nachfrage, »wir haben sie nie als präzise Zahlen ausgegeben« – und das übrigens auch so im Text geschrieben. Zwar zitierten viele Medien die Angabe »zwei bis fünf Jahre«, doch erwähnten die wenigsten, dass es sich nicht um eine statistische Analyse handelte.

Die berechnete künftige Reduktion der Lebenserwartung beruhte auf einer Reihe vereinfachender, aber unzutreffender Wenn-dann-Kalkulationen:

▶ Jeder heute übergewichtige Amerikaner habe einen BMI von 30 oder alternativ 35 (die Ober- und Untergrenze des Bereichs Adipositas Grad I).

▶ Der Vergleichsmaßstab sei eine fiktive Population, in der alle bis zu einem »optimalen« BMI von 24 abnehmen würden (obere Spanne des »gesunden Bereichs«) und in der Untergewicht die Sterblichkeit nicht erhöht.

▶ Das adipositasbedingte Sterberisiko bleibe über den gesamten Zeitraum gleich und künftiger medizinischer Fortschritt habe keinerlei Einfluss darauf.

Die als Ausgangsbasis dienenden Risikodaten waren überdies mehr als zehn Jahre älter waren als jene, die Flegal einbezog und die den dramatischen Fortschritt in der Behandlung von Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Diabetes zutreffender abbilden.

Sind diese Vereinfachungen vertretbar, dann verkürze sich – so Olshansky und seine Kollegen – die Lebenserwartung der amerikanischen Bevölkerung gegenwärtig um vier bis neun Monate gegenüber der fiktiven Vergleichspopulation. Die viel stärkere Verkürzung »um zwei bis fünf Jahre« war lediglich eine pessimistische Schätzung der Verhältnisse in »kommenden Jahrzehnten«, wenn mehr und mehr adipöse Kinder in die Erwachsenengeneration aufrücken und dort das Fettleibigkeitsproblem weiter verschärfen würden. In der Kindheit aufgebautes Übergewicht mündet oft in Gewichtsprobleme im Erwachsenenalter.

Angesichts der vielen Unsicherheiten wurde erst gar nicht geprüft, ob die der- ▷

Krank per Definition

$$\text{BMI} = \frac{\text{Gewicht in Kilogramm}}{(\text{Größe in Metern})^2}$$

Wer ist übergewichtig, wer fettleibig? Als Gradmesser dafür hat sich inzwischen international der Body-Mass-Index (BMI), der Körper-Masse-Index, etabliert. Definiert ist er als das Gewicht in Kilogramm, geteilt durch das Quadrat der Körpergröße in Metern. Er gilt – so das Robert Koch-Institut in Berlin – als das beste indirekte Maß für die Körperfettmasse, ist aber als einziges Kriterium für Übergewicht und Adipositas nur begrenzt aussagefähig. Statt nach den für Erwachsene angegebenen Kategorien sollte überdies bei Kindern und Jugendlichen die Einteilung nach der so genannten geschlechtsspezifischen Altersperzentile erfolgen.

Kategorien für Erwachsene					
unter 18,5	18,5 bis 24,9	25 bis 29,9	30 bis 34,9	35 bis 39,9	über 40
Untergewicht	Normalgewicht (USA: gesundes Gewicht)	Übergewicht	Adipositas Grad I	Adipositas Grad II	Adipositas Grad III

▷ art ermittelte Zahl verlorener Lebensmonate signifikant verschieden von null ist. In zahlreichen Interviews schien aber David Ludwig, ein weiterer Koautor, seiner Sache völlig sicher, wenn er die Effekte steigender Fettleibigkeitsraten mit »einem gewaltigen Tsunami, der auf die Vereinigten Staaten zurollt« verglich.

Kritiker bezeichnen Episoden wie diese als typisch für eine allgemeine Tendenz in einschlägigen Fachkreisen. Experten stellten den wachsenden Taillenumfang der Bevölkerung gewöhnlich als drohendes Desaster dar, weil »dies natürlich ihre Position stärkt und mehr Forschungsgelder einbringt. Staatliche Gesundheitsstellen wiederum begründen damit ihre Mittelvergabe«, schreibt Oliver. »Und die Pharmaindustrie rechtfertigt damit neue Mittel zur Therapie.«

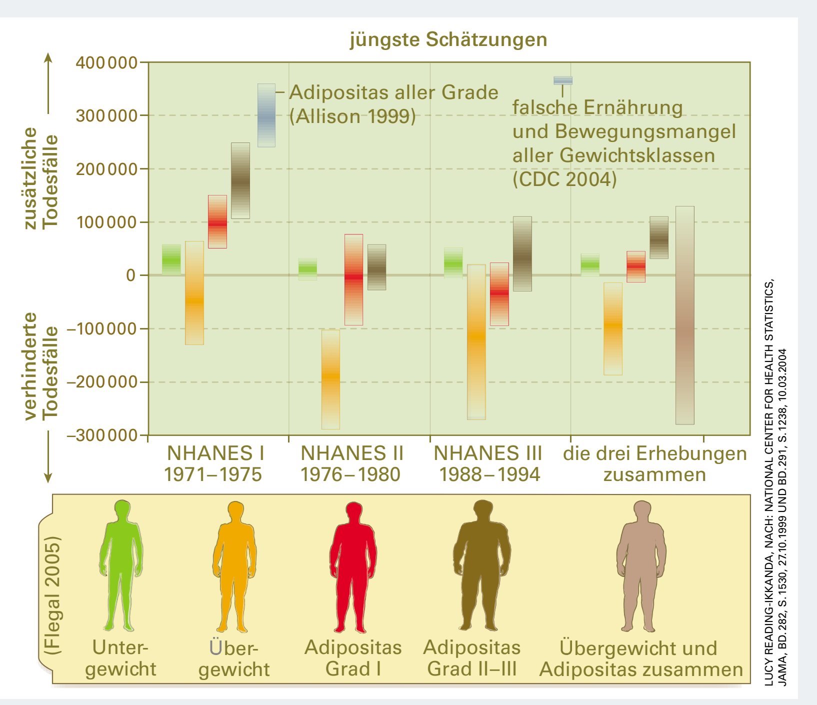
Beim Kampf gegen Fett gehe es eigentlich ums Geld, pflichtet Campos bei und verweist auf die finanzielle Unterstützung, die einflussreiche Adipositas-Forscher von zahlreichen Medikamenten- und Nahrungsmittelherstellern erhalten. Allison beispielsweise, Professor an der Universität von Alabama in Birmingham, legt finanzielle Zuwendungen von 148 solcher Firmen offen, und Hill ist als Berater für einige dieser Unternehmen tätig. Allerdings unterstellt ihnen keiner der Kritiker mehr als einen poten-

Fehlerhafte Sterberaten

Medienberichte über die Adipositas-Epidemie mehren sich sprunghaft, seit David B. Allison von der Universität von Alabama mit anderen Wissenschaftlern 1999 der Fettleibigkeit jährlich rund 300 000 Todesfälle in den USA anlastete (Grafik, linker blauer Balken). Obwohl das Team in seiner Veröffentlichung die Unsicherheiten und möglichen Verzerrungen auf Grund seines Berechnungsansatzes eingehend diskutierte, avancierte dieser Schätzwert in Publikumsmedien und Fachliteratur rasch zu einer Tatsache.

Ähnlich wie bei Wahlhochrechnungen wird aus einer relativ kleinen Stichprobe von Messdaten auf die Gesamtbevölkerung extrapoliert. Sind die Messwerte (in diesem Fall Daten zu Körpergröße, Gewicht und Todesraten) nicht hinreichend genau oder nicht repräsentativ für die Gesamtpopulation, kann das Ergebnis weit danebenliegen. Allison zog statistische Daten zum Mortalitätsrisiko verschiedener BMI-Kategorien aus sechs verschiedenen Erhebungen heran. Drei davon basierten auf Größen- und Gewichtsangaben der Teilnehmer selbst. Dies könnte zu einer Überschätzung des adipositasbedingten Risikos führen, da Dicke ihr Gewicht oft herunterspielen.

Nur eine der Erhebungen (NHANES I, siehe Grafik unten) war so konzipiert, dass sie die tatsächliche Zusammensetzung der US-Bevölkerung widerspiegelte. Durchgeführt wurde sie jedoch in den frühen 1970er Jahren, als Herzerkrankungen, etwa Infarkte, viel häufiger tödlich endeten. Damals wurden die Rauchgewohnheiten der Teilnehmer auch noch nicht so gut berücksichtigt wie in den späteren Studien.



LUCY READING-IKKANDA, NACH: NATIONAL CENTER FOR HEALTH STATISTICS, JAMA, BD. 282, S. 1530, 27.10.1999 UND BD. 291, S. 1238, 10.03.2004

Nun wirkt aber Rauchen hier als so genannte Störvariable, da sein Einfluss auf die Mortalität rechnerisch von dem der Adipositas getrennt werden muss. Gelingt diese Trennung nicht, so kann dies zu verfälschten Ergebnisse führen. Nach Aussagen von Statistikern der CDC und des amerikanischen Nationalen Krebsinstituts verwendeten Allison und seine Kollegen für solche Korrekturrechnungen auch eine ungeeignete Formel.

Der wohl wichtigste Nachteil der 1999 veröffentlichten Analyse war jedoch, dass das mit einem hohen BMI assoziierte Sterberisiko als konstant angesetzt und nicht bei steigendem Alter reduziert wurde (siehe Kasten rechte Seite).

Keiner dieser problematischen Aspekte kam überraschenderweise in einer Veröffentlichung der CDC im März 2004 zur Sprache – hier wurden mit Allisons Methode, einschließlich inkorrekter Formel, sogar jährlich 400 000 zusätzliche Todesfälle durch Adipositas geschätzt (rechter blauer Balken). Im Januar 2005 publizierte das Autorenteam dann zwar einen »korrigierten« Wert von jährlich 365 000 adipositasassoziierten Sterbefällen, die es »falscher Ernährung und Bewegungsmangel« zuschrieb. Korrigiert wurden jedoch nur Fehler bei der Datenerfassung.

Inzwischen bereitete Katherine Flegal, ebenfalls von den CDC, die Veröffentlichung einer neuen und erheblich optimierten Analyse vor. Ihrer Schätzung legte sie ausschließlich repräsentative Erhebungen zu Grunde, bei denen Körpergröße und -gewicht tatsächlich gemessen worden waren. Die Analyse setzt das Risiko als altersabhängig an und korrigiert, so Flegal, den Einfluss von Störvariablen angemessen. Aber »der weitaus wichtigste Grund für unsere andersartigen Resultate war, dass unsere Analyse auf neueren Daten basiert«.

Wie die Grafik (links) anhand der Lage der letzten Säule zeigt, ist alles andere als sicher, ob es überhaupt eine messbare Übersterblichkeit unter übergewichtigen und adipösen US-Amerikanern als Ganzes gibt. Selbst bei der Untergruppe mit einem BMI von über 35 (Adipositas Grad II bis III) in der NHANES-III-Studie liegt der plausible Bereich der Unter- und Übersterblichkeit zwischen 7000 Todesfällen weniger und 120 000 Todesfällen mehr als in der Population mit Normalgewicht, die als Nullpunkt dient.

ziellen Interessenkonflikt. Flegal und ihren Kollegen ist als Mitarbeitern der CDC die Annahme von Geldern von nichtstaatlicher Seite ohnehin untersagt.

Selbst die derzeit besten Mortalitätsstudien bieten nur ein fehlerbehaftetes, unvollständiges Bild der gesundheitlichen Konsequenzen der Adipositas-Epidemie – aus drei Gründen:

▶ Bei den bisherigen Untersuchungen wurde die Tatsache ignoriert, dass die menschlichen Körpermaße eine gewisse natürliche Variationsbreite aufweisen und jede wohlgenährte Gruppe somit einige adipöse Menschen umfasst. Der Begriff Epidemie in diesem Zusammenhang bezeichnet einen plötzlichen Anstieg dieses Basisanteils – und nicht das bloße Vorkommen von Fettleibigkeit an sich. Eine korrekte Bilanz, wie viele Menschenleben diese Epidemie verkürzt, dürfte also nur den Beitrag berücksichtigen, der von einer über der Norm liegenden Adipositas herrührt.

▶ Die Analysen verwenden zwar den Körper-Masse-Index als bequemen Näherungswert für das vorhandene Körperfett, doch ist der BMI nur ein indirektes Maß und in dieser Hinsicht begrenzt aussagefähig.

▶ Die Mortalität ist nicht das Einzige, was uns bekümmern sollte. Auch auf Gesundheitszustand und Lebensqualität kommt es an.

Wirkt Dicksein im Alter lebensverlängernd?

»Eine Fülle von Daten deutet darauf hin, dass sich Adipositas im Alter weniger stark auf die Mortalität auswirkt als in jüngeren Jahren«, erklärt Katherine M. Flegal, Forscherin an den Centers of Disease Control and Prevention (CDC) in Atlanta. »Für alte Menschen stellt ein hoher BMI offenbar keinen bedeutenden Risikofaktor dar; darauf lassen einige Studien schließen. Gewisse Reserven scheinen im Fall einer Erkrankung die Widerstandskraft des Patienten zu erhöhen. Wenn man die Zahl der Todesfälle durch Fettleibigkeit abschätzt, kommt es also entscheidend darauf an, welche Risikoabschätzungen man für die älteste Bevölkerungsgruppe nimmt. Fettleibigkeit dürfte zwar ein enormer Risikofaktor für junge Leute sein, aber ihre Todesrate insgesamt ist sehr gering.«



CORBIS / RONNIE KAUFMAN

Widersprüchliche Befunde

Keiner wird abstreiten, dass extreme Fettleibigkeit das Risiko für zahlreiche Krankheiten erhöht, doch diese Kategorie mit einem BMI von über 40 erreicht nur jeder zwölfte der rund 130 Millionen zu dicken amerikanischen Erwachsenen. Die Frage ist, ob der steigende Anteil lediglich übergewichtiger oder leicht bis mäßig adipöser Menschen die Häufigkeit von Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Krebs und Diabetes erhöht. Für Herzerkrankungen zumindest ist dies anscheinend nicht der Fall – oder noch nicht. Da die Gesundheitsbehörden der USA nicht jedes Jahr die Rate neu diagnostizierter Herz-Kreislauf-Erkrankungen ermitteln, schauen die Wissenschaftler stattdessen auf die Trends bei periodisch erhobenen Daten wie Mortalität oder Häufigkeit relevanter Risikofaktoren. Beide zeigen in den letzten Jahrzehnten fallende Tendenz.

Ein Beispiel: Gleichzeitig mit Flegals Artikel erschien in derselben Zeitschrift eine Arbeit von Edward W. Gregg und seinen Kollegen von den CDC, wonach der Prozentsatz von Erwachsenen mit Bluthochdruck in den USA von 1960 bis 2000 um die Hälfte gesunken sei. Der gleiche Trend zeigte sich für einen erhöhten Cholesterinspiegel – und beide Parameter nahmen bei Übergewichtigen und Adipösen stärker ab als bei Normalgewichtigen. Obwohl Bluthochdruck bei fettleibigen Menschen immer noch zweimal häufiger vorkommt als bei schlanken, haben »adipöse Personen heute bessere [Herz-Kreislauf-]Risikoprofile als schlanke Menschen vor 20 bis 30 Jahren«.

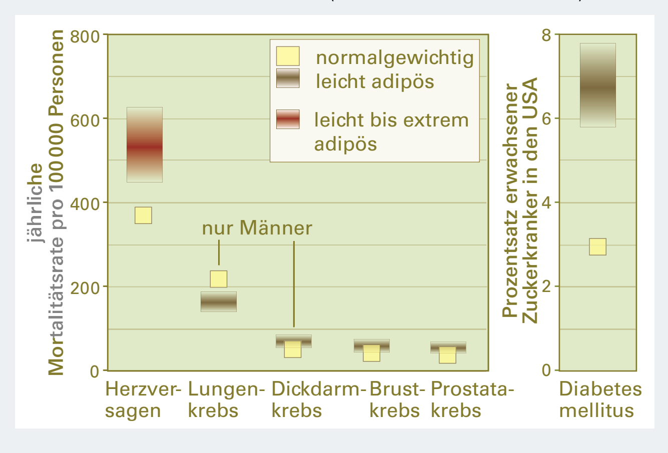
Die neuen Ergebnisse untermauern eine im Jahr 2000 veröffentlichten 10-Jahres-Studie der WHO, bei der 140 000 Menschen aus 38 Städten auf vier Kontinenten untersucht wurden. Das Team um Alun Evans von der Queen's-Universität im nordirischen Belfast beobachtete weithin eine Zunahme des durchschnittlichen BMI und eine ebenso breite Abnahme bei Bluthochdruck und hohem Cholesterinspiegel. »Diese Befunde sind schwer miteinander zu vereinbaren«, schrieb das Team damals.

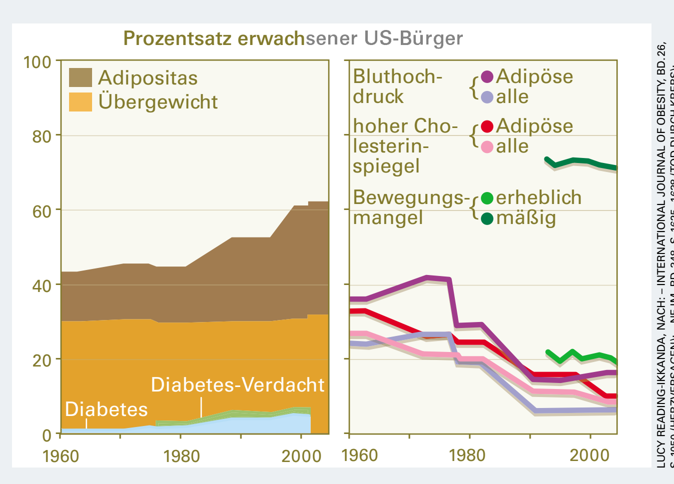
Möglicherweise haben die bessere Diagnose und Therapie von Bluthochdruck und Fettstoffwechselstörungen – so Gregg von den CDC – jegliche adipositasbedingte Zunahme dieser Erkrankungen überkompensiert. Auch könnte es sein, dass sich adipöse Menschen heute mehr bewegen als früher üblich, denn regelmäßige körperliche Aktivität gilt als eine wirksame Vorbeugung vor Herzerkrankungen.

Oliver und Campos diskutieren eine weitere Möglichkeit: dass Fettleibigkeit, zumindest teilweise, lediglich als ein sichtbarerer »Marker« für andere Risikofaktoren fungiert, die wichtiger, aber schwerer zu erkennen sind. Ernährungsweise, körperliche Fitness, Stress, Einkommen, Veranlagung und das Fettverteilungsmuster (Stichwort: Bierbauch) – sie verkörpern nur einen Bruchteil der vielleicht hundert beschriebenen »unabhängigen« Risikofaktoren für Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Die Beobachtungsstudien, die Fettleibigkeit mit Herzkrankheiten in Verbindung bringen, ignorieren fast alle diese Faktoren und lasten daher praktisch deren Ein- ▷

Adipositas und Krankheitsrisiken

Einigen Studien nach scheint leichte bis mäßige Fettleibigkeit das Risiko für bestimmte ernste Erkrankungen zu erhöhen, bis auf Lungenkrebs (untere Diagramme). Doch die Trends bei diesen Krankheiten lassen keinen einfachen Zusammenhang zwischen der epidemischen Zunahme der Adipositas und der Volksgesundheit in den USA erkennen (rechts und rechts außen).





LUCY READING-IKKANDA, NACH: – INTERNATIONAL JOURNAL OF OBESITY, BD. 26, S. 1050 (HERZVERSAGEN); – NEJM, BD. 348, S. 1625–1638 (TOD DURCH KREBS); – JAMA, BD. 293, S. 1871 (DIABETES); – JAMA, BD. 288, S. 1724, BD. 291, S. 2847 UND HEALTH, UNITED STATES, 2004 (ADIPOSITAS UND ÜBERGEWICHT); – DIABETES CARE, BD. 27, S. 2809 (DIABETESTREND); – JAMA, BD. 293, S. 1871 (BLUTDRUCK UND CHOLESTERIN); – CDC BEHAVIORAL RISK FACTOR SURVEILLANCE SYSTEM (KÖRPERLICHE AKTIVITÄTEN)

Diabetes hat in den letzten Jahrzehnten zugenommen, in den 1990er Jahren aber, anders als die Adipositas, nicht erheblich (oberes Diagramm, links). Zudem ist die Häufigkeit wichtiger Risikofaktoren für Herzerkrankungen in den letzten Jahrzehnten zurückgegangen (oben rechts).

▷ fluss der Adipositas an. »Nach dem gleichen Prinzip«, schreibt Oliver, könne man behaupten, »nicht das Zigarettenrauchen, sondern muffige Kleider, gelbverfärbte Zähne oder schlechter Atem seien an Lungenkrebs schuld.«

Nach einer 2003 veröffentlichten Studie, an der 900 000 erwachsene Amerikaner 16 Jahre lang teilnahmen, sterben übergewichtige und leicht adipöse Personen signifikant häufiger an bestimmten Arten von Tumoren. Die meisten dieser Krebsarten sind jedoch sehr selten und verursachten jährlich höchstens einige Dutzend Todesfälle pro 100 000 Studienteilnehmer. Was häufige Formen anbelangt, so hatten Frauen mit hohem BMI ein geringfügig höheres Risiko für Dickdarmkrebs sowie für Brustkrebs nach den Wechseljahren. Bei übergewichtigen und adipösen Männern war es vor allem Dickdarm- und Prostatakrebs. Hingegen schien eine gewisse Beleibtheit beide Geschlechter signifikant vor Lungenkarzinomen zu schützen, der Krebsart, die jährlich die meisten Todesopfer fordert (siehe Kasten oben). Dieser Zusammenhang blieb auch bestehen, wenn die Effekte des Rauchens berücksichtigt wurden.

Die größte Gesundheitsgefahr scheint Fettleibigen von Altersdiabetes – Diabetes mellitus Typ 2 – zu drohen. Zwischen Fettgewebe, Insulinproduktion und hohem Blutzuckerspiegel bestehen biologische Zusammenhänge. Die CDC schätzen, dass 55 Prozent der erwachsenen Diabetiker adipös sind, verglichen mit nur 31 Prozent der Allgemeinbevölkerung. Zudem hat neben der Adipositas auch die Häufigkeit der Zuckerkrankheit zugenommen, was einen kausalen Zusammenhang vermuten lässt.

Fett und Zucker

Die Kritiker widersprechen jedoch Aussagen, dass Diabetes (sogar bei Kindern) rapide zunimmt, dass Übergewicht die Ursache ist und dass Abnehmen das Problem löst. In einer Analyse aus dem Jahr 2003 kamen die CDC zu dem Schluss, dass »der Prozentsatz an Diabetes, ob diagnostiziert oder nicht, sowie an erhöhtem Nüchtern-Blutzucker in den 1990er Jahren offenbar nicht substanziell gestiegen ist« – trotz steilen Anstiegs der Fettleibigkeit.

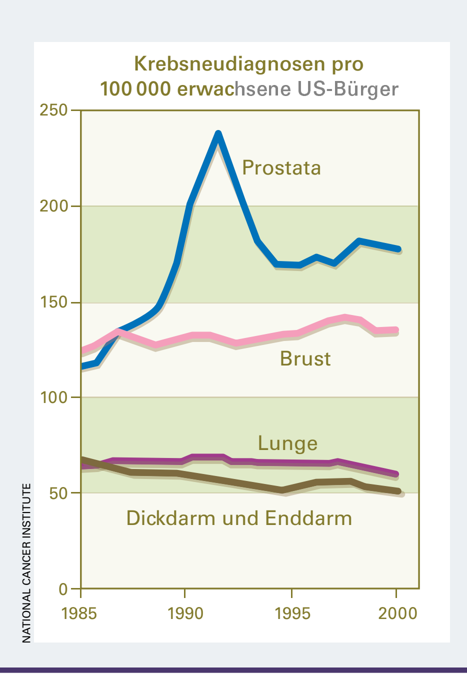
Ein »nichtdiagnostizierter Diabetes« besteht nach den Kriterien der CDC bei Menschen mit einem einmalig erhöhten Blutzuckerwert. Bei mindestens zweimalig erhöhten Werten gilt die Diagnose als gesichert. In seinem Artikel vom April wiederholt Gregg die oft zitierte »Tatsache«, dass auf fünf Erwachsene mit gesicherter Zuckerkrankheit jeweils drei weitere nichtdiagnostizierte Fälle kommen. »Verdacht auf Diabetes« wäre der bessere Begriff, da der Einzeltest, wie ihn die CDC verwenden, möglicherweise wenig aussagekräftig ist.

Bei einer 2001 publizierten Studie aus Frankreich, die 5400 Männer umfasste, erwiesen sich 42 Prozent der Probanden, die nach der CDC-Methodik »positiv« waren, 30 Monate später als nicht zuckerkrank. Für diesen Nachtest wurde eine als Goldstandard dienende Referenzmethode verwendet. Die Rate falsch negativer Ergebnisse hingegen – also der Anteil echter Diabetiker, der durch die Maschen des CDC-Einzeltest schlüpfte – lag bei gerade 2 Prozent.

Man schaue aber einmal auf das wachsende Gewicht der jungen Generation, insistiert der Adipositas-Forscher Hill. »Wir sehen heute Kinder von zehn bis zwölf Jahren, die einen Typ-2-Diabetes entwickeln. Zwei Generationen zuvor gab es überhaupt keine mit Altersdiabetes.«

Einzelfälle führten oft in die Irre, entgegnet Campos und verweist darauf, dass unter den 2867 jugendlichen Teilnehmern der NHANES-III-Studie von 1988–1994 laut CDC nur vier mit Typ-2-Diabetes zu finden waren. Bei einer enger gefassten Studie in Italien wurden 710 massiv fettleibige Kinder und Jugendliche im Alter von 6 bis 18 Jahren untersucht. Unter diesen dicksten der Dicken – von denen mehr als die Hälfte zuckerkranke Verwandte und damit wohl eine Veranlagung hatte – litt nur einer an Typ-2-Diabetes.

Trotz allem: Mindestens drei Prozent der erwachsenen US-Bürger dürften auf



Die Neuerkrankungsrate für Formen von Krebs, die mit einer Adipositas in Zusammenhang stehen könnten, zeigt ebenfalls ein kompliziertes Bild. Im Fall von Lunge und Darm ist sie leicht zurückgegangen. Möglicherweise schützt Dicksein sogar etwas vor manchen Arten von Lungenkrebs. Was den Aufwärtstrend bei Prostata- und Brustkrebs anbelangt, so könnte das hauptsächlich an besseren und breiteren Früherkennungsmaßnahmen liegen. Heute werden Tumoren erfasst, die früher unentdeckt blieben.

Grund ihrer Adipositas zuckerkrank sein – sofern Fettleibigkeit tatsächlich die Hauptursache dafür ist. Große Langzeitexperimente bieten die beste Möglichkeit, vermutete kausale Zusammenhänge zu prüfen, besonders wenn es gelingt, nur einen einzigen Faktor (wie das Körpergewicht) zu verändern, aber möglicherweise störende Einflüsse konstant zu halten. Bei so genannten randomisierten kontrollierten Studien werden die Probanden nach dem Zufallsprinzip beispielsweise einer Behandlungs- und einer Vergleichsgruppe zugeordnet. Bei hinreichend großer Zahl sollten in beiden Ausgangsgruppen Merkmale, die Einfluss auf das Ergebnis haben könnten, einigermaßen gleich verteilt sein. Erst wenige solcher Studien wurden von Adipositas-Forschern durchgeführt.

Einmal dick, immer dick?

»Wir wissen nicht, was geschieht, wenn man Dicke dünn macht«, erklärt Campos. »Nicht dass irgendetwas versäumt wurde, es ist ganz einfach nicht durchführbar« – außer durch chirurgische Eingriffe, die mit erheblichen Risiken und Nebenwirkungen verbunden sind.

»Rund 75 Prozent der amerikanischen Erwachsenen versuchen zu einem gegebenen Zeitpunkt gerade abzunehmen oder ihr Gewicht zu halten«, erklärt Ali Mokdad, Leiter einer Abteilung der CDC, die das Verhalten der Bevölkerung beobachtet. Die Marktforschungsfirma Marketdata Enterprises schätzt, dass im Jahr 2004 etwa 71 Millionen Amerikaner eine Diät machten. Insgesamt gaben die US-Bürger damals für Produkte und Programme zur Gewichtsreduktion 46 Milliarden Dollar aus.

Diäten erfreuen sich nun schon seit Jahren steigender Beliebtheit. Auch die Zahl chirurgischer Eingriffe zur Magenverkleinerung oder zum Einsetzen eines Magenbandes ist nach Erhebungen der Marktforscher von 36 700 im Jahr 2000 auf 140 000 im letzten Jahr hochgeschnellt. In der jüngsten Folgestudie der CDC fanden Flegal und andere Forscher aber unter den nichtadipösen Senioren nur 6 Prozent, die zehn Jahre zuvor adipös gewesen waren. Einmal dick – immer dick?

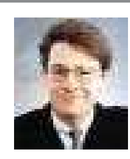
Diäten seien bei vielen Menschen auf Dauer nicht nur wirkungslos, sondern geradezu kontraproduktiv, meint Campos. Laut einer großen Studie der Harvard-Universität an Krankenschwestern hatten 39 Prozent der Frauen nach einer Gewichtsreduktion postwendend wieder zugelegt. Später brachten sie sogar durchschnittlich 4,5 Kilogramm mehr auf die Waage als Frauen, die nicht abgenommen hatten.

Befürworter der Gewichtsreduktion verweisen aber auf zwei Studien aus dem Jahr 2001: 58 Prozent weniger neudiagnostizierte Diabeteserkrankungen waren zu verzeichnen, wenn sich Menschen mit hohem Risiko für »Zucker« besser ernährten und mehr bewegten. Die Teilnehmer nahmen allerdings im Schnitt nur geringfügig ab: in der einen Studie um 2,7 Kilogramm nach zwei Jahren, in der anderen um 5,6 nach drei Jahren.

»Vielfach wird behauptet, diese Studien bewiesen, dass Abnehmen Diabetes vorbeugt. Dies ist nicht richtig«, bemerkt Steven N. Blair, Adipositas-Forscher am Cooper-Institut in Dallas (Texas). Der Grund: Es gab keine Vergleichsgruppe, die sich ausgewogen ernährte und regelmäßig bewegte, ohne abzunehmen. Daher ist nicht auszuschließen, dass die geringe Gewichtsabnahme lediglich ein Nebeneffekt der Verhaltensänderung war, die vielleicht eigentlich zählte. Tatsächlich schloss eine der Forschergruppen im Januar 2005 aus einer Folgestudie, dass »mindestens zweieinhalb Stunden Gehtraining pro Woche im Nachbeobachtungszeitraum das Diabetesrisiko um 63 bis 69 Prozent zu reduzieren scheint, und zwar weit gehend unabhängig von Ernährungsfaktoren und dem BMI.«

Der amerikanische Publizist und Kritiker »Henry Louis Mencken sagte einmal: ›Für jedes komplexe Problem gibt es eine einfache Lösung – und die ist falsch‹«, bemerkt Blair amüsiert. »Wir müssen endlich damit aufhören herumzuposaunen, dass Dicksein schädlich ist, dass Dicke ein Übel und willensschwach sind und dass alles eitel Sonnenschein wäre, wenn wir allesamt abnehmen. Wir müssen das Ganze wesentlich umfassender betrachten. Ich kann allerdings nicht erkennen, dass dies geschieht.« ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



W. Wayt Gibbs ist Wissenschaftsjournalist bei Scientific American.

Excess death associated with overweight, underweight and obesity. Von Katherine M. Flegal et al. in: Journal of the American Medical Association, Bd. 293, S. 1861, 20. April 2005

Secular trends in cardiovascular disease risk factors according to body mass index in US adults. Von Edward W. Gregg et al. in: Journal of the American Medical Association, Bd. 293, S. 1868, 20. April 2005

Physical activity in the prevention of type 2 diabetes. Von David E. Laaksonen et al. in: Diabetes, Bd. 54, S. 158, Januar 2005

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Titel

Menschheit am Scheideweg

Global gesehen prägen drei große historische Trends die Gegenwart – enormes Bevölkerungswachstum, zunehmender Wohlstand und dadurch eine steigende Bedrohung des Lebensraums Erde. Mit Phänomenen solcher Tragweite hat die Menschheit bislang wenig Erfahrung. Um reagieren zu können, gilt es zu begreifen, was auf uns zukommt. Die mit diesem Schwerpunkt beginnende Serie bietet ein Rahmenwerk für Vorschläge, wie wir mit den kommenden Problemen der Welt in diesem dramatischen Jahrhundert fertig werden können.

Die Welt im Jahr 2050

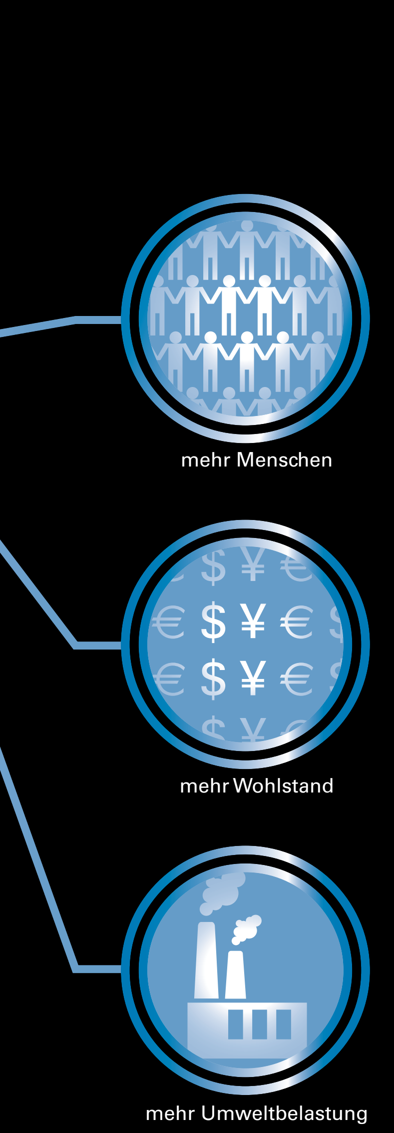
In diesem Heft:

Themen im November:

- ▷ Wege aus der Armut
- ▷ Biologische Vielfalt
- ▷ Wasser und Landwirtschaft

Themen im Dezember:

- ▷ Gesundheit
- ▷ Wirtschaft
- ▷ Prioritäten



Zukunftsstrategien



Aktionsplan für das 21. Jahrhundert

Die Menschheit steht an einem einzigartigen Wendepunkt ihrer Geschichte. Es ist eine Frage des Überlebens, schon jetzt die Weichen für die kommenden Jahrzehnte auf Nachhaltigkeit zu stellen.

Von George Musser

Nein, das versprochene Paradies bringt das 21. Jahrhundert wohl nicht. Was hatte man uns nicht alles noch vor einigen Jahrzehnten versprochen: fliegende Autos, Kolonien im Weltraum, die 15-Stunden-Woche, Haushaltsroboter, tragbare Fusionskraftwerke und sogar das völlige Verschwinden aller Krankheiten. Selbst seriöse Zukunftsforscher prophezeiten technologische Quantensprünge, hinter denen alles Bisherige verblassen sollte.

Doch die Realität fiel weit nüchterner aus. Nicht nur haben unsere Autos immer noch Bodenhaftung, ihre Abgase tragen dazu bei, die Atmosphäre aufzuheizen. Und eine umweltfreundliche Kernfusion bleibt ein Versprechen für unsere Enkel. Alles in allem wird das junge Jahrhundert wohl eine der kritischsten Phasen der Menschheitsgeschichte.

Wissenschaftler erwarten, dass drei sehr problematische Entwicklungen, die einst von der industriellen Revolution angestoßen wurden, um 2050 den Höhepunkt erreichen:

- Nach Jahrhunderten eines mehr als exponentiellen Wachstums dürfte sich die Weltbevölkerung bei etwa neun Milliarden Menschen einpendeln.
- Gleichzeitig nimmt extreme Armut ab. Wenn China und Indien ihre Wirtschaft weiter so voranbringen wie vor ihnen Japan und Südkorea, kann sich der Durchschnittschinese Mitte des Jahrhunderts eines Wohlstands erfreuen, wie ihn ein typischer Bürger der Schweiz heute genießt, der »mittlere« Inder lässt sich dann mit einem heutigen Israeli vergleichen.
- Doch mehr Menschen und mehr Wohlstand fordern ihren Preis und bringen den Planeten an den Rand seiner Belastbarkeit. Schon heute pumpen wir täglich dreimal so viel Kohlendioxid in die Atmosphäre, wie Ozeane und Kontinente in dieser Zeit wieder binden können. Bereits um 2050 dürfte die resultierende globale Erwärmung wirklich schmerzhaft zu spüren sein. Und wenn der Raubbau an Wäldern und Fischgründen so weitergeht wie bisher, werden diese Ressourcen schon zuvor erschöpft sein.

Demografie, Ökonomie und Ökologie – diese drei miteinander vernetzten Entwicklungslinien werden Historiker analysieren, die eines Tages auf unser Zeitalter zurückblicken. Kein Bereich wird von Veränderungen verschont bleiben, ob auf geopolitischer oder familiärer Ebene. Wie es der Soziobiologe Edward O. Wilson von der Universität Havard in Cambridge (Massachusetts) formulierte, schicken wir uns an, durch einen Flaschenhals zu schlüpfen, eine Phase maximaler Beanspruchung natürlicher Ressourcen wie unseres Einfallsreichtums. Mit Phänomenen solcher Tragweite hat die Menschheit leider wenig Erfahrung.

Sie zeigen sich aber bereits in jedermanns Alltag. Stichwort Demografie: Wer hat sich nicht schon in der eigenen Stadt fremd gefühlt, weil sie in den letzten Jahren so gewachsen ist? Doch die Familien werden kleiner, und immer mehr Kinder wachsen nicht nur ohne Geschwister auf, sondern auch ohne ▷

ERDE: NASA; BUTTONS: O. GABRIEL / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

▷ Tanten, Onkel oder Kusinen. Das mögen manche traurig finden, doch es stabilisiert die Größe der Weltbevölkerung; die Alternative wäre eine höhere Sterblichkeitsrate. Und die ökonomische Seite der Entwicklung? Zum Beispiel chinesische Produkte in westlichen Supermarktregalen, Westgüter in asiatischen Haushalten. Und hier noch zwei Alltagsbeispiele aus dem ökologischen Bereich: Die globale Erwärmung lässt heute schon Frühlingsblumen etwa eine Woche früher erblühen als noch vor fünfzig Jahren. Und das wachsende Angebot ungewohnter Speisefische in Restaurants zeugt nicht von weltoffener Küche, sondern von der Überfischung beliebter Arten.

Ende des Wachstums?

Das vermutlich größte Problem – und direkt oder indirekt Ursache vieler anderer – ist das Wachstum der Weltbevölkerung. Nun, da es an Tempo verliert und in einigen Jahrzehnten zum Stillstand kommen dürfte, bietet sich eine Chance, dieses Kapitel im Buch der Geschichte endlich abzuschließen. Es mag schmerzen, sich durch einen Flaschenhals zu zwängen. Doch haben wir das geschafft, liegt das Schlimmste hinter uns. Allerdings tauchen sicher neue Problem auf, wenn zum Beispiel die Weltbevölkerung generell wie jetzt schon in den Industriestaaten überaltert. Debatten über Renten und soziale Sicherungssysteme zeugen von einer Gesellschaft, die über das Leben nach dem großen Wachstum nachdenkt.

Offenbar kommt den Demografen ein wichtige Rolle bei der Entwicklung von Strategien zu. Doch wie verlässlich sind ihre Prognosen? Vor dreißig Jahren warnten sie vor einer Bevölkerungsexplosion, in jüngerer Zeit befürchten Neokonservative das Gegenteil. Tatsächlich hat die Kopfzahl in Familien der Dritten Welt stärker als erhofft abgenommen, sodass einige Szenarien global nicht ein Bevölkerungsplateau erwarten, sondern sogar einen Rückgang (siehe erste Grafik im rechten Kasten). Allerdings erscheint ein negatives Wachstum seinerseits problematisch: Im Lauf der Geschichte hatte eine zahlenmäßig stabile oder gar schrumpfende Gesellschaft meist auch in anderer Hinsicht ihren Zenit überschritten. Doch nach wie vor wächst die Menschheit in absoluten Zahlen noch gewaltig – und mit ihr der Energiehunger und andere Bedürfnisse (siehe die Beiträge S. 36 und 44).

Es scheint dringend angeraten, über die offenen Fragen ohne vernebelnde Ideologien zu sprechen. Und einige gute Ideen zeichnen sich bereits ab, wie der hier präsentierte Aktionsplan für das 21. Jahrhundert (siehe den Kasten unten). Er ist sicherlich nicht der einzige Weg, aber eine diskussionswürdige Ausgangsbasis.

Noch basiert Wirtschaftswachstum global auf einem Mehr an Produktivität, auf wachsender Arbeitskraft und einem immer stärkeren Verbrauch an Ressourcen. Doch in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts könnte die Menschheit einen Gleichgewichtszustand erreicht haben, in dem Profite einzig aus der Produktivität geschöpft werden. Das dürfte dem Konflikt zwischen Ökonomie und Umwelt einiges an Schärfe nehmen.

Zumal er vielleicht nicht unabdingbar ist. Ein Leitthema des Aktionsplans lautet, dass die Wirtschaft nicht der Feind der Natur sein muss und umgekehrt. Noch messen Ökonomen die Wirtschaftsleistung eines Landes anhand von statistischen Größen wie dem Bruttoinlandsprodukt, das keinen Ressourcenverbrauch berücksichtigt. Doch wer einen Wald komplett abholzt, steigert zwar kurzfristig den wirtschaftlichen Ertrag, vernichtet aber einen aktiven Posten, der stete Einnahmen hervorbringen könnte.

Leitlinien für die Zukunft

Wer seinem Land und der Menschheit helfen will, die Herausforderungen des 21. Jahrhunderts erfolgreich zu bestehen, sollte diesen Acht-Punkte-Plan beachten.

▶ **1. Verstehe die grundlegenden Veränderungen,** die sich hinter den Tagesmeldungen verbergen: Die Menschheit wird noch wachsen, wenn auch langsamer, dabei zunehmend in städtische Ballungsräume strömen und überdies überaltern (siehe Artikel S. 36).

▶ **2. Nutze fossile Brennstoffe** effizienter und mache dich davon unabhängig (siehe S. 44). Die Aufgabe ist leichter und kostengünstiger zu bewältigen, als es scheint. Wer die Kohlendioxidemissionen nicht kappt, riskiert eine Klimakatastrophe.

▶ **3. Erhalte kritische Lebensräume,** denn das Aussterben einer Tier- oder Pflanzenart ist nicht umkehrbar. Viele wirtschaftlich bedeutsame Lebewesen sind bedroht, ob wilde Getreideformen oder Fischarten wie der Stör. Auch einen Urwald zu erhalten, statt ihn in Ackerland oder Viehweiden zu verwandeln, kann sich letztlich sogar ökonomisch auszahlen.

▶ **4. Erreiche die Entwicklungsziele** für das 21. Jahrhundert hinsichtlich Armut und Ungleichheit auf der Welt. Geht es den Menschen besser, wird es leichter sein, Umweltprobleme wie Entwaldung und Luftverschmutzung in der Dritten Welt anzugehen.

▶ **5. Hilf den Bauern** in der Dritten Welt durch einfache Bewässerungssystem wie handbetriebene Pumpen und Tropfsysteme. Damit lassen sich Erträge schon deutlich steigern, ohne die Wasserressourcen bis auf den letzten Tropfen auszubeuten.

▶ **6. Stärke die Prävention** in der Gesundheitsversorgung. Beachte dabei die großen Unterschiede: In Ländern mit rascher Industrialisierung wie China und Indien laufen inzwischen zivilisationsbedingte Krankheiten wie Herzinfarkt, Krebs und Stresssymptome den Infektionskrankheiten den Rang ab – wie schon länger in den reichen Nationen. Der Dritten Welt hingegen nutzen vor allem Programme gegen Infektionskrankheiten, von Moskitonetzen bis zu Impfstoffen.

▶ **7. Richte die Wirtschaft auf Nachhaltigkeit,** nicht auf Wachstum aus. Dazu werden neue Systeme etwa der Besteuerung und Regulierung von Ressourcenverbrauch erforderlich sein.

▶ **8. Setze Prioritäten** nach Maßgabe der Vernunft, nicht nach den Forderungen von Interessenvertretern. Der Markt kann Ökologie und Ökonomie weit besser in Einklang bringen, als es ein Staat durch Vorgaben könnte – sofern das Kosten-Nutzen-Verhältnis natürlicher Dienstleistungen in harter Währung nachzurechnen ist.

Drei Trends, welche die Welt verändern werden

DAS BEVÖLKERUNGSWACHSTUM VERLANGSAMT SICH ...

Weltbevölkerung in Milliarden

14, 12, 10, 8, 6, 4, 2, 0

hohe Variante

mittlere Variante

niedrige Variante

1820, 1860, 1900, 1940, 1980, 2020, 2060, 2100

Jahr

WOHLSTAND BREITET SICH AUS ...

Milliarden Menschen in extremer Armut

1,6, 1,2, 0,8, 0,4, 0

hohe Variante

Armut

Zielvorgabe beim Jahrtausendwechsel

niedrige Variante

Bruttoinlandsprodukt

globales Bruttoinlandsprodukt pro Kopf (in Dollar, Stand 1990)

20000, 15000, 10000, 5000, 0

1820, 1860, 1900, 1940, 1980, 2020, 2060

Jahr

... ABER DER CO_2-AUSSTOSS WIRD BESORGNISERREGEND

Emissionen aus der Verbrennung fossiler Treibstoffe (in Gigatonnen Kohlenstoff)

16, 14, 12, 10, 8, 6, 4, 2, 0

hohe Variante

niedrige Variante

Emissionen, die Ozeane und Kontinente wiederaufnehmen können

1820, 1860, 1900, 1940, 1980, 2020, 2060

Jahr

QUELLEN: 1. A. MADDISON, UNIV. GRONINGEN (HISTORICAL POPULATION AND GPD); 2. U.N. POPULATION DIVISION (POPULATION PROJECTIONS); 3. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATIC CHANGE (ECONOMIC PROJECTIONS, SCENARIOS A1 AIM AND A2 ASF, RESCALED; EMISSIONS PROJECTIONS, SCENARIONS A2 ASF AND B1 IMAGE); 4. F. BOURGUIGNON, EHESS & C. MORRISSON, UNIV. PARIS-I (HISTORICAL POVERTY); 5. WORLD BANK 2005 WORLD DEVELOPMENT INDICATORS (2001 POVERTY); 6. U.N. MILLENIUM PROJECT (POVERTY PROJECTION); 7. G. MARLAND, T.A. BODEN & R. J. ANDERS, ORNL (HISTORICAL EMISSIONS); 8. D. SHINDELL, NASA, GISS (SUSTAINABLE EMISSIONS LEVEL)

JEN CHRISTIANSEN

Im Übrigen berücksichtigt der Preis für Waren und Dienstleistungen selten die damit verbundenen Umweltkosten. Diese Zeche zahlen wir in anderer Form. Schätzungen zufolge subventioniert etwa der amerikanische Steuerzahler den Autoverkehr, den Bergbau und andere stark umweltbelastende Aktivitäten im Schnitt mit etwa 2000 Dollar pro Jahr. Denn der verzerrte Markt bietet weder Produzenten noch Konsumenten Anreize, ihr Verhalten zu ändern.

Wahrer Reichtum

Seit einigen Jahren versuchen Ökonomen und Ökologen deshalb, gemeinsam die »Dienstleistungen« der Natur zu bewerten, ihnen sozusagen Preisschilder anzuhängen. Was vielleicht sehr materialistisch klingt, enthüllt in Wirklichkeit, wie sehr der Mensch von seiner natürlichen Umgebung abhängig ist. Es würde beispielsweise Unsummen kosten, das gesamte Trinkwasser künstlich zu filtern, zum Glück übernimmt das meist das Erdreich. UN-Generalsekretär Kofi Annan initiierte 2001 das internationale Forschungsprogramm »Millenium Ecosystem Assessment«, dessen Ergebnisse im März dieses Jahres publiziert wurden. Insgesamt 24 Kategorien von »Dienstleistungen« unterschieden die 1360 teilnehmenden Wissenschaftler, davon beutet die Menschheit 15 schneller aus, als sie sich regenerieren.

Werden aber die Umweltkosten angemessen eingerechnet, ergibt sich oft: Was gut ist für die Natur, nutzt auch der Ökonomie. Fischer beispielsweise würden ihren Gewinn maximieren, wenn sie Gewässer und einzelne Arten nur auf einem nachhaltigen Niveau bejagen. Ansonsten schrumpfen Fangmengen wie Profite gleichermaßen, wenn immer mehr Menschen hinter immer weniger Fischen her sind. Zugegeben: Nicht immer sind die beiderseitigen Vorteile so deutlich, mitunter geht es nicht ohne Kompromisse. Aber die Fachleute haben ja auch erst angefangen, dieses Thema zu erkunden.

In den kommenden Jahrzehnten müssen Politiker wie Führungskräfte der Wirtschaft die Rahmenbedingungen richtig setzen, um der Menschheit eine lebenswerte Zukunft zu ermöglichen. Zu diesen Entscheidungen »von oben« gesellen sich eine Unzahl »von unten«, die jeder Einzelne zu treffen hat, ob es um die Zahl seiner Kinder oder die Investition in eine Wärmedämmung geht, die Größe der Herde oder die Anschaffung einer Wasserpumpe. Nicht der Besitz von Computern oder DVD-Rekordern macht wahren Reichtum und Lebensqualität aus, sondern eine funktionierende Kanalisation, gute Ernährung, das Gefühl von Sicherheit. Wenn es Wissenschaft und Technologie gelingt, den Menschen ein Wohlergehen zu sichern, dann ist das weit spektakulärer als der Bau fliegender Autos oder Kolonien auf dem Mars. ◁

AUTOR UND LITERATUR



George Musser ist Redakteur bei Scientific American.

Herausforderung Zukunft. Technischer Fortschritt und Globalisierung. Elsevier / Spektrum Akademischer Verlag, 2. Aufl., Heidelberg 2005

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Leben mit neun Milliarden Menschen

Wie wird unser Leben aussehen, wenn wir in fünfzig Jahren neun Milliarden zählen? Wie verschiebt sich das Verhältnis von Arm und Reich, Jung und Alt, Stadt- und Landbevölkerung?

Von Joel E. Cohen

Das gegenwärtige Jahrzehnt erfährt drei noch nie da gewesene Übergangsphasen der Menschheitsgeschichte. Erstmals leben nun etwa seit dem Jahr 2000 auf der Erde mehr alte als junge Menschen. Ungefähr ab dem Jahr 2007 wird es mehr Stadtbewohner als Landbevölkerung geben. Und seit dem Jahr 2003 gebären Frauen im weltweiten Durchschnitt nicht einmal oder gerade so viele Kinder im Lauf des Lebens, wie erforderlich ist, um sich und die Männer in der nächsten Generation zu ersetzen.

Nimmt man die Hundertjahrspanne um die letzte Jahrtausendwende, verzeichnen Demografen weitere drei einmalige Phänomene. Erstens: Niemand, der vor 1930 starb, durchlebte eine gesamte Verdopplungsspanne der Weltbevölkerung. Voraussichtlich wird das ebenso wenig denen geschehen, die im oder nach dem Jahr 2050 zur Welt kommen. Wer dagegen heute 45 Jahre oder älter ist, war Zeitgenosse, als sich unsere Anzahl zwischen 1960 und 2005 sogar mehr als verdoppelte – von damals drei auf jetzt sechseinhalb Milliarden. Die höchste Wachstumsrate aller Zeiten, etwa 2,1 Prozent im Jahr, lag zwischen 1965 und 1970. Nie vor dem 20. Jahrhundert hat sich die Population des Homo sapiens so rasant vergrößert – und Gleiches dürfte ihr wohl zukünftig nicht mehr widerfahren. Auch wenn wir selbst es damals nicht so verspürten – kommende Generationen werden die Gipfelpassage in den späten 1960er Jahren als das bedeutendste demografische Geschehen der Menschheitsgeschichte bewerten.

Zweitens: Dass die Wachstumsrate der Weltbevölkerung seit 1970 so dramatisch fiel – auf heute »nur noch« 1,1 oder 1,2 Prozent jährlich –, geht vor allem auf die Entscheidung von Milliarden von Paaren für weniger Kinder zurück. Sicherlich stieg oder fiel die Rate des Bevölkerungswachstums auch in der Vergangenheit öfter. So sorgten im 14. Jahrhundert große Seuchen und Kriege für einen Rückgang nicht nur der Wachstumsrate, sondern sogar der Zahl der Menschen insgesamt. Doch das geschah unbeabsichtigt. Niemals vor dem 20. Jahrhundert wurde diese Rate freiwillig zurückgeschraubt.

Und schließlich drittens: Die erwähnte Hundertjahrspanne brachte und bringt riesige demografische Umwälzungen zwischen den mehr und den weniger entwickelten Weltregionen. Wiesen Letztere 1950 etwa doppelt so viele Menschen auf wie Erstere, so wird sich das Verhältnis bis 2050 auf über sechs zu eins steigern.

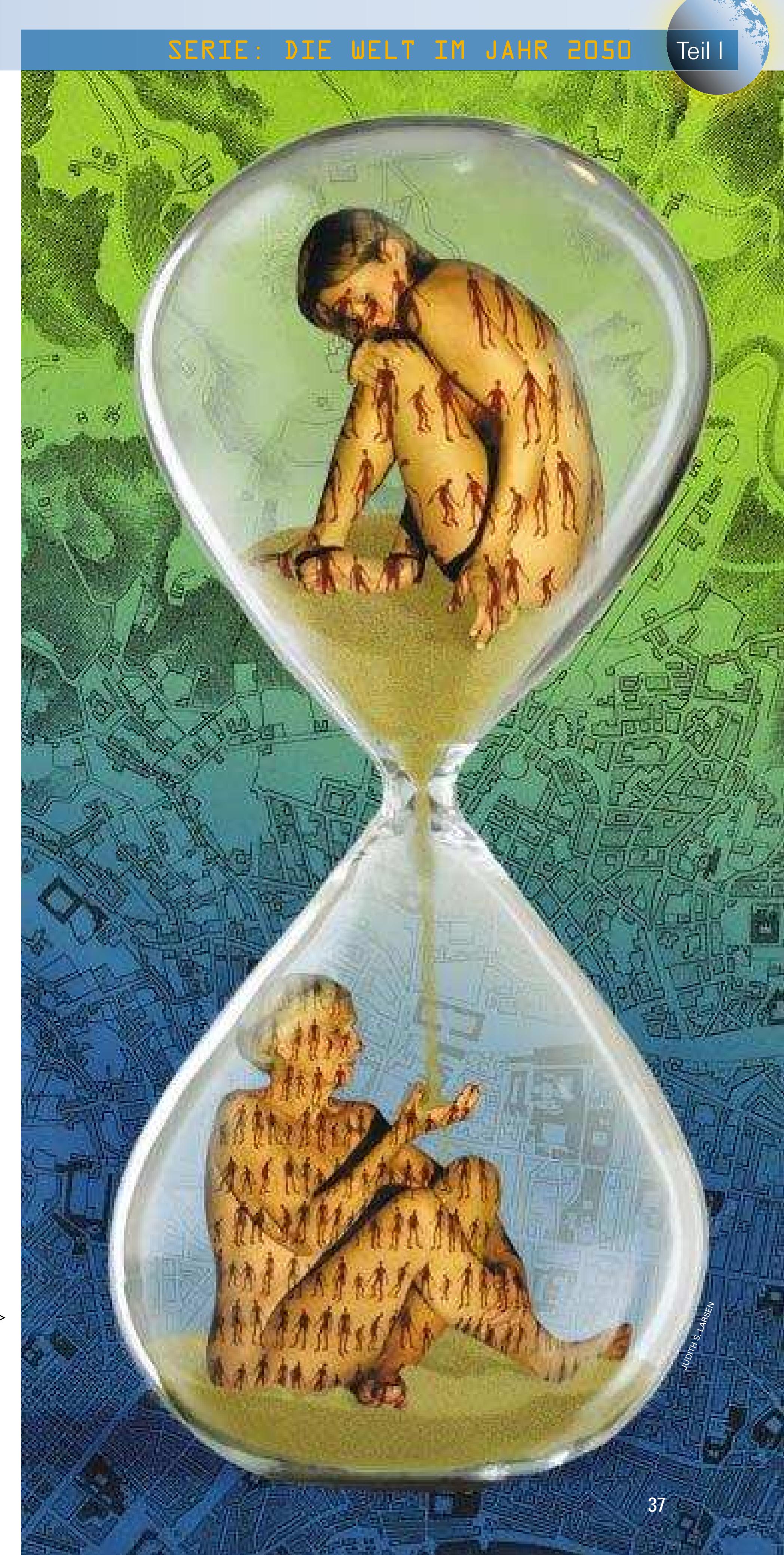
Die Öffentlichkeit nimmt von all dem im großen Ganzen kaum Notiz. Allenfalls schenkt die Politik gelegentlich dem einen oder anderen Begleitsymptom einige Aufmerksamkeit. Jedoch vermisst man, um ein Beispiel aus den USA zu nehmen, dort bei den Reformvorschlägen betreffs Sozialversicherung oft den Aspekt, dass auch die amerikanische Bevölkerung deutlich altert. Ebenso wird bei vielen Diskussionen über eine Zuwanderungspolitik in den USA wie in Europa nicht berücksichtigt, wie sehr die eigenen Wachstumsraten von denen der südlichen Nachbarn abweichen.

In den nächsten Jahrzehnten wird die Weltbevölkerung größer sein als im 20. Jahrhundert. Sie wird langsamer wachsen, die Menschen werden im Durchschnitt älter sein und zu einem größeren Teil in Städten leben. Diese vier Aspekte werde ich im Folgenden genauer betrachten. Sie dürften die kommenden demografischen Veränderungen beherrschen. Ich möchte auch einiges dazu sagen, was der Wandel langfristig bedeutet. Natürlich sind genaue Projektionen, so der Fachausdruck für diese Art von rechnerischen Zukunftsszenarien, mit hoher Unsicherheit behaftet. Nehmen wir die Fertilitätsrate, die durchschnittliche Anzahl lebend geborener Kinder einer Frau: Bereits kleinere Verschiebungen darin ergeben völlig andere Bevölkerungsendzahlen. Trotzdem liefern die Projektionen eine Vorstellung dessen, was uns in den nächsten fünfzig Jahren erwartet.

Projektionen für 2050

Zwar sinkt die Rate des Bevölkerungswachstums seit den 1970er Jahren – trotzdem ist der absolute Zuwachs immer noch höher als jemals vor dem Zweiten Weltkrieg. Das liegt an der Dynamik solcher Prozesse. Für ihre erste Milliarde benötigte die Menschheit alle Zeit seit Beginn ihrer Existenz bis ins frühe 19. Jahrhundert. Wir heute werden eine weitere Milliarde schon in 13 bis 14 Jahren hervorbringen. Nach den Projektionen steigt die Weltbevölkerung bis zum Jahr 2050 auf 9,1 Milliarden – plus oder minus zwei Milliarden, abhängig von den angenommenen künftigen Geburts- und Sterblichkeitsraten. Das würde bedeuten: In nicht einmal fünfzig Jahren leben nochmals 2,6 Milliarden mehr Menschen als die heutigen 6,5 Milliarden. Die Zunahme in den nächsten viereinhalb Jahrzehnten überstiege die Größe der gesamten Weltbevölkerung von 1950, die damals etwa 2,5 Milliarden betrug.

Kurzum, das schnelle Bevölkerungswachstum ist noch nicht zu Ende. Die Anzahl der Menschen steigt gegenwärtig pro Jahr um 74 bis 76 Millionen. Im Ver-


JUDITH S. LARSEN

gleich dazu: Deutschland hat jetzt rund 82,5 Millionen Einwohner. Das meiste Wachstum werden aber nicht die reichen Staaten beisteuern, sondern die ärmeren. In einigen der ärmsten – in Afghanistan, Burkina Faso, Burundi, im Tschad, Kongo, in der Demokratischen Republik Kongo, in Osttimor, Guinea-Bissau, Liberia, Mali, Niger sowie Uganda – wird sich die Bevölkerung bis 2050 gegenüber heute zumindest verdreifachen.

Voraussichtlich konzentriert sich praktisch der gesamte Bevölkerungszuwachs der nächsten 45 Jahre auf heute wirtschaftlich weniger entwickelte Regionen (siehe Kasten S. 40/41). Der Unterschied zu den wohlhabenden Ländern rührt von den dort wesentlich höheren Geburtenraten her. Obwohl in den armen Ländern in allen Altersgruppen auch verhältnismäßig mehr Menschen sterben, bleibt daher das Wachstum immer noch sehr hoch. Gegenwärtig bekommt in armen Ländern eine Frau mit im Schnitt 2,9 fast doppelt so viele Kinder wie in reichen Ländern. Dort sind es statistisch 1,6 Kinder pro Frau.

Die Hälfte des weltweiten Zuwachses wird sich voraussichtlich auf nur neun Staaten verteilen. Das dürften Indien, Pakistan, Nigeria, die Demokratische Republik Kongo, Bangladesch, Uganda, die USA, Äthiopien und China sein – in der Reihenfolge des erwarteten Beitrags. Dass die Vereinigten Staaten als einziges reiches Land auf der Liste stehen, liegt an der hohen Einwanderungsrate, wodurch rund ein Drittel des Anstiegs in den USA beigesteuert wird.

Demgegenüber stehen 51 meist wirtschaftlich besser entwickelte Länder oder Regionen, deren Bevölkerung bis 2050 schrumpft. Das deutsche Statistische Bundesamt errechnete bis 2013 einen leichten Anstieg auf 83 Millionen, bis 2050 einen Abfall auf gut 75 Millionen Einwohner. Italien dürfte von 58 auf 51 Millionen abnehmen, Japan von 128 ▷

Wir haben es nicht zuletzt selbst in der Hand, wie gut wir unseren Weg in die Zukunft finden werden.

▷ auf 112 Millionen. Am dramatischsten wird nach den Rechnungen die Bevölkerung Russlands schrumpfen: von derzeit 143 auf 112 Millionen. Russland wird am Ende sogar noch etwas weniger Menschen haben als Japan.

Ein im Ganzen langsameres Bevölkerungswachstum bedeutet, dass das 20. Jahrhundert wahrscheinlich das letzte war, in dem auf der Welt mehr jüngere als ältere Menschen lebten. Der Anteil von Kindern bis zu vier Jahren war 1955 am höchsten. Damals betrug er 14,5 Prozent. Er ging dann langsam zurück und liegt heute bei 9,5 Prozent. Der Anteil der mindestens 60-Jährigen stieg dagegen von 8,1 Prozent für 1960 auf heute 10,4 Prozent. Um das Jahr 2000 lagen die beiden Altersgruppen mit jeweils etwa 10 Prozent gleichauf. Künftig werden die Älteren zahlenmäßig die Oberhand haben. Diese Entwicklung resultiert sowohl aus einer höheren Lebenserwartung der Menschen als auch aus weniger Nachkommen einer Frau. Das im Weltdurchschnitt erreichte Lebensalter wuchs von ungefähr 30 Jahren zu Beginn des 20. auf über 65 Jahre Anfang des 21. Jahrhunderts. Größer ist aber der Einfluss sinkender Fertilität. Ihretwegen erhalten die jüngeren Altersgruppen weniger Verstärkung.

DIE BEVÖLKERUNGSFRAGE

Das Problem

▶ Schnelles Bevölkerungswachstum treibt die Anzahl der Menschen bis 2050 nach der wahrscheinlichsten Projektion um fast 50 Prozent nach oben, von jetzt 6,5 auf 9,1 Milliarden. Der Zuwachs wird sich fast ausschließlich auf bestehende und neue Städte in Entwicklungsländern konzentrieren. Im gleichen Zeitraum wird die Bevölkerung vieler reicherer Nationen schrumpfen. Die weltweit sinkenden Fertilitätsraten und die steigende Lebenserwartung lassen auch den Anteil versorgungsbedürftiger älterer Menschen anwachsen.

Der Plan

Einen größeren Kuchen backen, dazu weniger Gabeln verteilen, ihn trotzdem manierlicher essen:

▶ Intensiviere die menschliche Produktivität durch Förderung von Bildung, Gesundheit und Technologie.

▶ Sorge für mehr medizinische Betreuung Schwangerer und junger Mütter sowie für leichteren Zugang zu Verhütungsmitteln, damit die Menschen freiwillig dafür sorgen, dass das Bevölkerungswachstum langsamer wird.

▶ Verbessere das Miteinander durch Reformen in Wirtschaft, Politik, Verwaltung und Sozialwesen sowie durch mehr soziale und rechtliche Gleichheit.



CORBIS-ZEFA, FRANS LEMMENS

Die Bevölkerung Nigers wächst Projektionen zufolge bis 2050 um 258 Prozent.

Allerdings altert die Bevölkerung nicht überall gleich schnell. In besser entwickelten Regionen wird im Jahr 2050 fast jeder Dritte 60 Jahre oder älter sein, dagegen in weniger entwickelten Gebieten nur jeder Fünfte. In elf der schwächsten Länder rechnen Experten sogar mit einer Altersverteilung, bei der jeder Zweite noch nicht 24 Jahre zählt. Es handelt sich um Afghanistan, Angola, Burundi, den Tschad, die Demokratische Republik Kongo, Äquatorialguinea, Guinea-Bissau, Liberia, Mali, Niger und Uganda.

Die Projektionen besagen auch, dass sich praktisch das sämtliche weitere Bevölkerungswachstum bis 2050 in städtischen Ballungsräumen abspielt, sofern sich die jüngsten Entwicklungen fortsetzen. Bildlich gesprochen müssen die armen Länder bis dahin allwöchentlich zusammen mehr als eine Millionenstadt aus dem Boden stampfen.

Die wirkliche Kapazität der Erde

Langzeitprojektionen bis 2050 und darüber hinaus sind in der Demografie inzwischen Routine. Im Gegensatz dazu pflegen ökonomische Modelle weniger für so lange Zeitspannen ausgelegt zu sein, weil sich grundlegende Parameter unvorhergesehen ändern können – etwa bezüglich Institutionen oder Technologien sowie der Vorherrschaft von Regionen und Wirtschaftszweigen. Mit Vorbehalt sagen die meisten ökonomischen Modelle aber zunehmenden Wohlstand voraus.

In den sonnigsten ökonomischen Szenarien verengt sich die Kluft des Pro-Kopf-Einkommens zwischen Industrie- und Entwicklungsländern von geschätzten 16 zu 1 im Jahr 1990 auf einen Wert zwischen 6,6 und 2,8 zu 1 im Jahr 2050. Selbstverständlich bedeuten solche Angaben keine Gewähr dafür, was wirklich sein wird. Anderen Modellen zufolge nimmt die Armut nicht ab.

Wenn man nun die Projektionen ernst nimmt – was bedeutet dies dann für die Natur wie die Erde überhaupt, für unsere Lebensqualität und die künftiger Generationen, wenn in den Entwicklungsländern noch einige Milliarden mehr Menschen leben und wenn überall der Anteil Älterer wächst? Kann die Erde das noch tragen, besonders wenn der Wohlstand weltweit tatsächlich zunimmt? So mancher macht sich darum Sorgen.

Kurzfristig vermag unser Planet eineinhalb Mal so viele Menschen wie heute aufzunehmen und zu ernähren – zumindest wenn man nur minimale Ansprüche stellt. Schon heute würden die Getreideernten genügen, um 10 Milliarden Menschen rein vegetarisch zu versorgen. Nun äußerte aber der 1997 verstorbene amerikanische Soziologe und Demograf Kingsley Davis 1991 sinngemäß: »In keinem Land der Welt geben sich die Menschen damit zufrieden, dass sie gerade satt werden.« Es ist durchaus die Frage, ob das Leben in fünfzig Jahren den Milliarden von Menschen Entscheidungsfreiheit und materiellen Wohlstand bietet, was auch immer sie dann darunter verstehen werden. Wie es damit in hundert oder zweihundert Jahren aussieht, ist wieder etwas anderes. Das alles hat unbedingt mit Nachhaltigkeit zu tun: damit, die Ressourcen nicht zu übernutzen, sodass kommende Generationen nicht das Nachsehen haben.

Im Grunde sind solche Befürchtungen uralt. 3600 Jahre alte Keilschrifttafeln zeigen, dass schon die Babylonier beunruhigt waren, weil ihnen die Welt übervölkert erschien. Der englische Nationalökonom und Sozialphilosoph Thomas Malthus äußerte sich im Jahr 1798 ähnlich, gleichfalls die Autoren des Anfang der 1970er Jahre erschienenen Berichts für den Club of Rome »Die Grenzen des Wachstums«. Doch es gab auch immer wieder Zuversichtliche, die darauf vertrauten, höhere Mächte würden schon alles richten – andere glaubten an den technischen Fortschritt.

Wie viele Menschen kann die Erde nun aber tragen? Eine notwendige Bedingung für Nachhaltigkeit ist – so die Annahme früher Schätzversuche –, dass die menschliche Population nicht mehr Land zum Leben brauchen darf, als dafür überhaupt nutzbar ist. Somit ließe sich das Erfüllen dieser Voraussetzung in »Landeinheiten« messen. Die älteste bekannte Berechnung dieser Art stammt von dem niederländischen Naturforscher Antony van Leeuwenhoek (1632 – 1723). Er machte 1679 folgende Schätzung: Das besiedelte Gebiet der Welt ist 13 385-mal so groß wie Holland; die Bevölkerung Hollands hat rund eine Million Menschen; angenommen, »die besiedelte Fläche der Erde ist ebenso dicht bewohnt wie Holland, was kaum der Fall sein dürfte, dann ergibt das 13,385 Milliarden Menschen« – also eine Obergrenze von um die 13,4 Milliarden.

In Fortsetzung dieser Denkweise prägte in jüngster Zeit ein Kreis um den in Amerika lebenden Schweizer Forscher Mathis Wackernagel den Begriff »ökologischer Fußabdruck«. Mittels dieser Metapher umschreibt die Forschergruppe all das, was der Mensch jeweils an Umweltressourcen zur Ver- und Entsorgung braucht. Dies versucht sie über die dafür beanspruchte Fläche Land zu erfassen, also praktisch in einer Währung von Landeinheiten zu messen.

Nach vorläufigen Berechnungen des Teams nutzte die gesamte Menschheit im Jahr 1961 rund 70 Prozent der Kapazität der Biosphäre. Dem standen 120 Prozent im Jahr 1999 gegenüber. Mit anderen Worten: 1999 hätten wir die Umwelt schneller ausgebeutet, als sie sich wieder regenerieren konnte. Das werten Wackernagel und seine Kollegen als eindeutig nicht nachhaltig und somit auf Dauer nicht tragbar.

Einseitige Sicht

Dieser Ansatz ist in vieler Hinsicht durchaus problematisch. Vielleicht am kritischsten mag daran der Versuch sein, eine wesentliche Voraussetzung für Nachhaltigkeit in einer einzigen Maßeinheit auszudrücken, wofür in dem Fall die biologisch produktive Fläche genommen wird. Beispielsweise kalkuliert das Team Energieverbrauch in Landeinheiten, indem es die erforderlichen Waldflächen abschätzt, die das beim Verbrennen von Energieträgern frei werdende Kohlendioxid wieder absorbieren können. Doch bei manchen Energie liefernden Technologien, etwa bei Solarzellen, Wasser- oder Kernkraftwerken, entsteht kein Kohlendioxid. Würde nun die gesamte Energieerzeugung auf Kernenergie umgestellt, verlagerte sich das Dilemma von zu viel Kohlendioxid auf einen zu hohen Verbrauch von Kernbrennstoffen. Die Problematik fehlender Nachhaltigkeit bliebe zwar bestehen, doch wäre die biologisch produktive Fläche Land hierfür kein geeignetes Maß.

Auch andere Ressourcen wurden als einzelner begrenzender Faktor erwogen, unter anderem Wasser, Energie, Nahrung oder verschiedenste für die Nahrungsmittelproduktion unverzichtbare chemische Stoffe. Allerdings bemisst sich vor Ort der Wert eines jeden In- ▷

Verschiedene Projektionen des Wachstums bis 2050

Gegenwärtig leben auf der Erde 6,5 Milliarden Menschen. Die für 2050 berechneten Bevölkerungszahlen hängen von Annahmen über unsere künftigen Entscheidungen ab. Insbesondere betrifft das die Fertilität, also wie viele Kinder eine Frau hat.

9,1 Milliarden
heutiger Trend des Fertilitätsrückgangs setzt sich fort

11,7 Milliarden
Fertilität bleibt auf dem Niveau von heute

10,6 Milliarden
bei im Mittel nur einem halben Kind mehr pro Frau, als der gegenwärtige Trend erwarten lässt

7,7 Milliarden
bei im Mittel einem halben Kind weniger pro Frau, als der gegenwärtige Trend erwarten lässt

dexfaktors immer auch aus dem Wert anderer Faktoren. Ein Beispiel: Ist Trinkwasser knapp, Energie aber im Überfluss vorhanden, mag es leicht fallen, Meerwasser zu entsalzen und Wasser über größere Distanzen heranzuschaffen; wo Energie viel kostet, könnte sich das verbieten.

Wer die Tragfähigkeit der Erde für Menschen kalkulieren will – beziehungsweise anders herum gesagt: wer zu ermessen versucht, wie groß die Menschheit sein darf, wenn Nachhaltigkeit noch gewährleistet sein soll –, der muss sowohl begreifen, welche Zwänge die Natur vorgibt, als auch, welche Wahlmöglichkeiten die Menschen haben. Hinzu kommt, dass beides ineinander greift. Einige der natürlichen Grenzen werden in anderen Beiträgen dieser Serie behandelt. An dieser Stelle möchte ich auf Aspekte des menschlichen Entscheidungsspielraums aufmerksam machen, die sich darauf auswirken, was man überhaupt als nachhaltig wertet.

Wichtige Fragen hierzu sind: Was werden im Jahr 2050 und in fernerer Zeit die Wünsche der Menschen materielles Wohlergehen betreffend sein – und welchen Durchschnittswert, auch welche Verteilung von Wohlstand akzeptieren sie dann? Was für Technologien wird man in der Zukunft benutzen? Welche nationalen und internationalen politischen Institutionen wirken bei Konfliktlösungen mit? Welche Wirtschaftseinrichtungen geben Kredite, lenken den Handel, setzen Standards fest und finanzieren Investitionen? Welche sozialen und demografischen Regelungen nehmen auf Geburt, Gesundheit, Ausbildung, Heirat, Migration und Sterben Einfluss?

In was für einer Umgebung – das betrifft die biologische ebenso wie die physikalische und chemische Umwelt – möchten die Menschen in späteren Zeiten gern leben? Welche Schwankungen sind sie bereit hinzunehmen? (Angenommen, der Menschheit macht es nichts aus mitzuerleben, wie sie in klimatisch ungünstigen Zeiten um Milliarden schrumpft – dann betrachtet sie in guten Zeiten vielleicht eine wesentlich größere Bevölkerung als tragbar.)

Bis zu welcher Höhe werden Menschen noch Risiken eingehen wollen? (Ob sie zum Beispiel die Möglichkeit von Erdrutschen, Wirbelstürmen oder Hochwasser hinnehmen, entscheidet auch über die als bewohnbar einzustufende Landfläche.) Welche Zeitspanne in die Zukunft wird dann bei solchen Entscheidungen zählen?

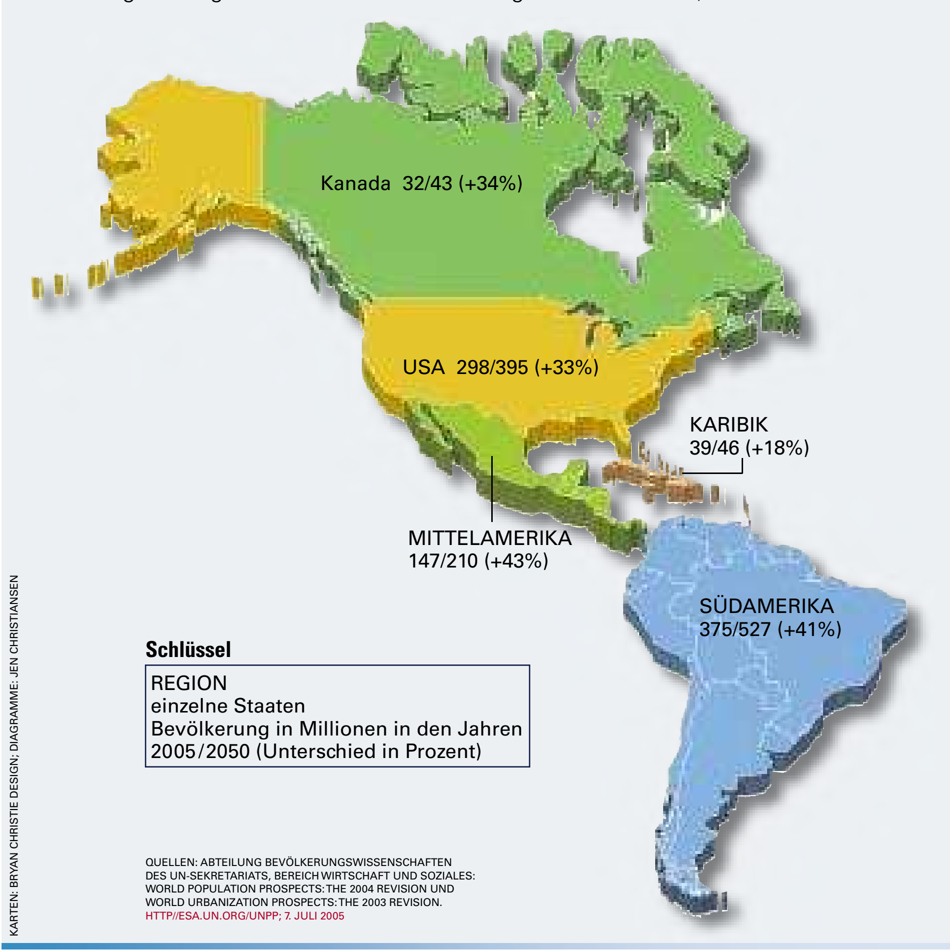
Und schließlich ganz wesentlich: Welche Werte werden gelten? Was hat für die Menschen der Zukunft Gewicht? Der Anthropologe Donald L. Hardesty von der Universität von Nevada in Reno schrieb 1977: »Besitzt ein Stück Land eine geringe Tragfähigkeit, muss das nicht an der schlechten Bodenqualität liegen. Vielleicht ist dieses Land heilig oder dort wohnen Geister.«

In den meisten veröffentlichten Arbeiten mit Schätzungen, wie viele Menschen die Erde tragen kann, werden Antworten auf eine oder mehrere der obigen Fragen unkritisch angenommen. In meinem Buch »How Many People Can the Earth Support?« (Wie viele Menschen kann die Erde tragen?) habe ich über fünf Dutzend solcher Arbeiten seit 1679 zusammengetragen und analysiert. Allein die Schätzungen der letzten fünfzig Jahre gehen weit auseinander – von weniger als einer Milliarde bis zu 1000 Milliarden Menschen als tragbare Bevölkerungsobergrenze. Im Grunde handelt es sich um politisch motivierte Zahlen. Teilweise sollen die Leute glauben, dass die Welt längst übervölkert ist; teils will man ihnen weismachen, ein fortgesetzt starkes Wachstum sei nicht weiter schlimm.

Wissenschaftliche Zahlen wollen die Realität beschreiben. Aber keine der erwähnten Studien setzt sich wirklich mit den oben aufgelisteten Fragen auseinander, indem sie die grundverschiedenen

Weltbevölkerung im Übergang

Ungleiches Wachstum wird das Bevölkerungsungleichgewicht zwischen reichen und armen Ländern noch mehr vergrößern. Gegenwärtig leben in den entwickelten Ländern (hier das gesamte Europa, Nordamerika, Australien, Neuseeland, Japan) 1,2 Milliarden Menschen, in den weniger entwickelten 5,3 Milliarden. Für

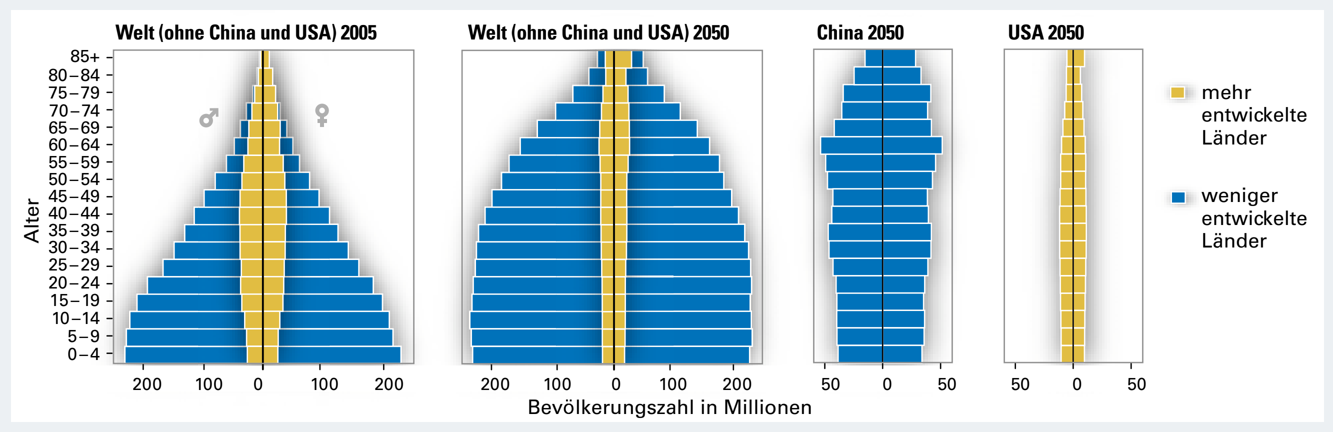


2050 bleibt die Zahl für sämtliche reichen Länder zusammen etwa gleich. Die armen Staaten wachsen bis dahin auf 7,9 Milliarden Menschen an. Ab 2010 schrumpft die Bevölkerung mancher reichen Länder wegen sinkender Kinderzahlen. Auch in den Entwicklungsländern sinkt die Fertilitätsrate etwa bis 2035 auf im Durchschnitt 2,1 Kinder pro Frau. Aber manche dieser Länder werden länger über diesem »Ersatzniveau« bleiben (bei dem die Geburten die Todesfälle ausgleichen).

NORDEUROPA 96/106 (+10%)
OSTEUROPA 297/224 (–25%)
Russische Föderation 143/112 (–22%)
WESTEUROPA 185,9/185,5 (–0,2%)
SÜDEUROPA 149/139 (–7%)
NORDAFRIKA 191/312 (+63%)
China 1316/1392 (+6%)
Japan 128/112 (–13%)
WESTAFRIKA 264/587 (+122%)
OSTASIEN 1524/1587 (+4%)
SÜDOSTASIEN 556/752 (+36%)
WESTASIEN 214/383 (+79%)
MITTELAFRIKA 110/303 (+175%)
SÜD- UND ZENTRALASIEN 1611/2495 (+55%)
SÜDLICHES AFRIKA 54/56 (+4%)
OSTAFRIKA 288/679 (+136%)
OZEANIEN (mit Australien) 33/48 (+45%)

Altersaufbau heute und morgen

Auch die Altersstruktur von Bevölkerungen ist durch Fertilitätsunterschiede geprägt. In den schnell wachsenden Entwicklungsländern ist die nächstjüngere Kohorte derzeit jeweils größer als die vorangehende. Grafisch ergibt das eine typische »Alterspyramide«. Bei sinkender Fertilität und zunehmender Alterung bildet sich später eine Glockenform. In entwickelten Ländern – mit niedrigen Geburtenraten und hoher Lebenserwartung – ergibt sich mehr eine Säule, die kopflastiger wird. China und die USA sind jeweils Ausnahmen ihrer Kategorie. Chinas langjährige Ein-Kind-Politik gleicht die Altersstruktur der von entwickelten Ländern an. Die USA bleiben infolge starker Einwanderung »jünger« als die meisten entwickelten Länder.



QUELLE: M.R. MONTGOMERY ET AL., CITIES TRANSFORMED: DEMOGRAPHIC CHANGE AND ITS IMPLICATIONS IN THE DEVELOPING WORLD, NATIONAL ACADEMIES PRESS 2003

▷ gesellschaftlichen und kulturellen Sichtweisen hinsichtlich der Antworten berücksichtigt. Deswegen ist zu sagen, dass noch keine wissenschaftliche Schätzung dazu vorliegt, wie viele Menschen denn auf Dauer auf der Erde leben könnten.

Allzu oft lenkt die Fokussierung auf langfristige Nachhaltigkeit davon ab, dass schon das Morgen dringend der Verbesserung bedarf. Wissenschaftler wie Praktiker hätten da ein großes Aufgabenfeld. Im Folgenden seien zwei größere demografische Trends angesprochen: die Verstädterung und die Alterung. Beide Felder bieten durchaus Entscheidungsspielräume.

Viele größere Städte liegen entweder in landwirtschaftlich besonders produktiven Gegenden – typischerweise an fruchtbaren Flussniederungen. Oder sie stehen an Küsten beziehungsweise auf Inseln, wo sie Fischerei und Seehandel erlauben. Angenommen, in den nächsten fünfzig Jahren verdoppelt sich die Bevölkerung der Städte in etwa – von jetzt drei auf dann sechs Milliarden Menschen –, die Landbevölkerung bleibt aber fast gleich und beträgt dann noch immer rund drei Milliarden; weiter angenommen, die Stadtfläche dehnt sich insgesamt aus, statt dass eine verdichtete Bebauung die neuen Menschenmassen aufnimmt. Unter diesen Umständen ginge zum einen viel an fruchtbarer, bewirtschafteter Fläche verloren. Zum anderen stiegen an den Küsten die Schwierigkeiten mit der Wasserverschmutzung.

Nimmt man jene 50 Prozent der Weltbevölkerung, die am engsten zusammenleben, so bewohnen diese Menschen gegenwärtig 2 bis 3 Prozent der eisfreien Landfläche der Erde. Sollten sich die urbanen Flächen wie die Zahl der Stadtbewohner bis 2050 verdoppeln, würden Städte dann 6 Prozent der eisfreien Fläche einnehmen. Ein Großteil dessen dürfte von den ohnehin nur etwa 10 bis 12 Prozent allen Landes abgehen, die man als landwirtschaftlich nutzbar einschätzt. Stadtplanung ohne weitere Einbußen an Agrarland wäre auch in urbanem Interesse. Städte sind nun einmal auf eine Lebensmittelbelieferung angewiesen. Würde noch vorhandenes Agrarland verschont, verringerten sich die Auswirkungen eines Stadtwachstums auf die Nahrungsproduktion beträchtlich.

Verstädterung und Alterung

Solange in den urbanen Zentren nicht ein nennenswerter Gartenanbau aufkommt, gilt: Jeder Landbewohner ernährt heute schon einen Städter mit, und in nicht einmal fünfzig Jahren wird er zwei mitversorgen (wobei gegenwärtig in der Hauptsache Frauen die Nahrungsmittel anbauen und ernten). Wie es in vielen reichen Ländern schon geschah, könnte die Nachfrage nach Nahrungsmitteln die Landarbeiter schließlich von der Armut erlösen – vor dem Hintergrund einer ansteigenden Agrarproduktivität und der Technologien, welche die Städte den Bauern liefern. Allerdings kann das auch eine Schattenseite haben: Erfordern die Ertragssteigerungen mehr chemische Dünge- und Pflanzenschutzmittel, könnte dies die Umwelt erheblich belasten.

In den wachsenden Städten andererseits drohen schwere Infektionen, sofern es nicht gelingt, sauberes Wasser für alle bereitzustellen und Abwässer wie Abfälle hygienisch zu entsorgen. Aber Städte bieten auch auf dem Ausbildungs- und kulturellen Sektor mehr, die medizinische Versorgung ist einfacher, und nicht zuletzt sind die Arbeitsmöglichkeiten größer. Man könnte die Chance ergreifen und die neuen Städte besser planen und organisieren als die alten. Immerhin

Unsicherer Faktor Migration

Migration kann die Verlangsamung der weltweiten Bevölkerungszunahme verstärken. Denn zeitverzögert übernehmen Menschen, die aus einem kinderreichen in ein kinderarmes Land ziehen, bei der Familienplanung oft das Verhalten ihrer neuen Umwelt. Nach Projektionen haben die reichen Regionen im Zeitraum bis 2050 etwa 2,2 Millionen mehr Zuzügler als Abwanderer. Rund die Hälfte dieses Immigrantenüberschusses dürfte die USA aufnehmen.

Mehr als die meisten anderen demografischen Variablen wird die Migration durch nationale politische Maßnahmen bestimmt, was die Projektionen erschwert. Bliebe das jetzige Migrationsniveau bestehen, würden bis 2050 zusätzlich netto 98 Millionen Zuzügler in die entwickelten Regionen kommen. Den erwarteten eigenen Schwund um 73 Millionen machte das mehr als wett. Verschiedene Szenarien zeigen, dass die Migration in reichen Ländern wenig Einfluss auf den stark wachsenden Anteil der Älteren gegenüber der Gruppe im Erwerbsalter haben wird. Doch könnte sich die Zuwanderung deutlich auf die Bevölkerungsgröße auswirken.

Dazu Projektionen vom Statistischen Bundesamt der USA: Ohne Zuwanderung ergaben sich für 2050 328 Millionen, entsprechend einem 20-prozentigen Bevölkerungszuwachs. Die höchste angenommene Zuwanderung – eine zunehmende Netto-Immigration, die bis 2050 auf 2,8 Millionen Menschen jährlich ansteigt – brächte achtzig Prozent Zuwachs oder 553 Millionen US-Bewohner. Das Verhältnis Älterer zu Erwerbsfähigen wird in jedem Fall in den USA zwischen 2010 und etwa 2035 stark und dann langsamer wachsen. 39 Prozent der Bevölkerung würden die Älteren im Jahr 2050 ohne jede Immigration ausmachen. Mit der höchsten angenommenen Einwanderung wären es trotzdem noch 30 Prozent.

GETTY IMAGES, SPENCER PLATT

Neue US-Bürger beim Schwur auf die amerikanische Verfassung

sind 50 Prozent der urbanen Infrastruktur von 2050 in den kommenden Jahrzehnten neu zu erstellen. Die Aufgabe ist riesig, aber auch faszinierend.

Wie sollen wir mit der zunehmenden Alterung der Weltbevölkerung umgehen – deren Problematik teilweise mit der Verstädterung verknüpft sein wird? In der Stadt zu leben zahlt sich vielerorts für jüngere, besser ausgebildete Arbeitskräfte aus. Die damit einhergehende Mobilität schwächt allerdings oft die traditionellen Familienverbände und damit das Netzwerk, das die Älteren bisher auffing. Hatten ältere Frauen ohne Schulbildung auf dem Land Arbeit und familiären Rückhalt, so würden viele dieser Frauen in der Stadt nicht leicht ihr Auskommen oder ein soziales Netz finden.

Der Anteil nicht mehr erwerbstätiger Menschen ab 65 Jahren wird in den meisten Ländern nach 2010 beschleunigt ansteigen gegenüber der Gruppe der 15- bis 64-Jährigen, jener im erwerbsfähigen Alter. Zuerst und besonders krass trifft der Umschwung die weiter entwickelten Staaten. Die am wenigsten entwickelten erleben nach 2020 eine langsame Zunahme dieses Verhältnisses und erreichen dann bis 2050 annähernd den Wert, wie ihn die besser entwickelten Länder 1950 aufwiesen.

Direkt vom Alter auf die dadurch bedingte wirtschaftliche und soziale Last zu schließen liefert jedoch kein zuverlässiges Bild. Ob und wie hohe Kosten ein älterer Mensch verursacht, hängt außer von seiner Gesundheit auch davon ab, ob es für ihn Möglichkeiten gibt, selbst Geld zu verdienen, sowie von den sozialen Einrichtungen.

Der globale Trend in dieser Altersklasse geht in Richtung bessere Gesundheit – auch wenn ernste Probleme diesbezüglich in manchen Regionen auftreten, deren Volkswirtschaft sich im Übergang befindet oder die mit Aids zu kämpfen haben. Beispielsweise nahm in den USA die Rate chronischer Behinderungen unter Älteren zwischen 1982 und 1999 rasch ab. 1999 waren 25 Prozent weniger Menschen davon betroffen, als bei einer gleich bleibenden Rate zu erwarten gewesen wäre.

Entscheidenden Einfluss auf die Versorgungslast durch Ältere hat der Familienstand. Oft steht der Partner an erster Stelle, wenn Pflege notwendig wird. Im Vergleich zu nicht verheirateten, verwitweten oder geschiedenen betagten Personen werden Verheiratete häufiger zu Hause versorgt. Die Bürde durch bejahrte Bevölkerungsgruppen hängt im Einzelfall in komplexer Weise nicht nur von den Lebensjahren, dem Geschlecht und dem Familienstand ab, sondern auch davon, ob sich etwa Kinder oder Enkel um die alten Eltern kümmern können. Der sozioökonomische Status ist gleichfalls wichtig – hier besonders der erlangte Bildungsgrad. Wer in der Jugend eine bessere Ausbildung erhielt, erfreut sich im Alter höherer Gesundheit.

Um die anrollende Welle alter Menschen verkraften zu können, wäre es folglich eine gute Strategie, heute in die Ausbildung der Jugend zu investieren. Dazu gehörte auch, sie zu gesunder Lebensweise zu erziehen sowie Verhalten zu fördern, das stabile Ehen wahrscheinlich macht. Eine weitere einleuchtende Strategie wäre, ökonomische Produktivität und soziales Engagement von älteren Menschen zu erleichtern und in entsprechende wirtschaftliche und soziale Institutionen zu investieren.

Niemand kennt den Weg zur Nachhaltigkeit, denn niemand kennt das Ziel, so es denn eines gibt. Wir wissen aber viel darüber, was wir heute tun könnten, um das Morgen besser zu gestalten – besser als die Zukunft würde, wenn wir unsere Kenntnisse nicht einbrächten. Der Wirtschaftswissenschaftler Robert Cassen von der London School of Economics sagte es so: »Im Grunde alles, was aus Bevölkerungssicht nötig ist, muss ohnehin getan werden.« ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Joel E. Cohen ist Bevölkerungswissenschaftler. Er hat leitende Professuren an der Rockefeller- und an der Columbia-Universität in New York. Zu seinen Forschungsfeldern gehören Populationsbiologie, Demografie, Ökologie sowie Epidemiologie von Mensch und Tieren.

Demography: Measuring and modeling population processes. Von Samuel H. Preston et al. Blackwell Publishers, 2001

A concise history of world population. An introduction to population processes. Von Massimo Livi-Bacci. Blackwell Publishers, 3. überarbeitete Auflage 2001

How many people can the earth support. Von Joel E. Cohen. W. W. Norton, 1995

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Weniger Energie – mehr Gewinn

Sparsamer Verbrauch von Kohle und Erdöl dient nicht nur dem Klimaschutz. Effiziente Energienutzung kann Unternehmen und Verbraucher auch reicher machen.

Von Amory B. Lovins

Die gesamte Klimadebatte krankt an einem grundlegenden Missverständnis. Experten auf beiden Seiten behaupten, der Schutz des globalen Klimas erzwinge einen Kompromiss zwischen Umwelt und Wirtschaft. Wenn wir weniger fossile Brennstoffe verbrauchen, um die globale Erwärmung zu bremsen, dann steigen, so die Experten, unweigerlich die Kosten für die Deckung unseres Energiebedarfs – und dazu zählt alles vom schnellen Transport bis zur heißen Dusche. Umweltschützer halten diese Kosten für vertretbar. Doch die Skeptiker, unter ihnen höchste Vertreter der US-Regierung, warnen, der zusätzliche Aufwand wäre unerschwinglich.

Dabei liegen beide Seiten falsch. Wohlverstandener Klimaschutz würde in Wahrheit Kosten senken, nicht erhöhen. Die effizientere Nutzung von Energie ist wirtschaftlich gesehen eine Goldgrube – nicht, weil es sich lohnt, die Erderwärmung zu stoppen, sondern weil es viel billiger ist, fossile Brennstoffe einzusparen, als sie zu kaufen.

Weltweit existiert eine Fülle erfolgreicher Methoden zur produktiveren Energienutzung, und kluge Unternehmen nutzen diese Chance längst. Im Lauf der letzten zehn Jahre hat der Chemieriese DuPont seine Produktion um beinahe 30 Prozent gesteigert, aber zugleich den Energieverbrauch um 7 Prozent gesenkt und die Emissionen von Treibhausgasen – gemessen in deren Kohlendioxid-Äquivalent – um stolze 72 Prozent reduziert; dadurch hat der Konzern bisher mehr als 2 Milliarden Dollar eingespart. Die fünf Großkonzerne IBM, British Telecom, Alcan, NorskeCanada und Bayer haben zusammen seit den frühen 1990er Jahren mindestens 2 Milliarden Dollar gespart, indem sie ihre Kohlenstoffemissionen um mehr als 60 Prozent einschränkten. Bereits im Jahr 2001 erreichte der Ölgigant BP sein für 2010 gesetztes Ziel, den Kohlendioxidausstoß um 10 Prozent unter das Niveau von 1990 zu drücken; damit kappte er seine Energiekosten um 650 Millionen über zehn Jahre hinweg. Und erst im Mai 2005 versprach General Electric, seine Energieeffizienz bis zum Jahr 2012 um 30 Prozent zu steigern, um den Wert der Firmenaktien zu erhöhen.

Diese und andere scharf kalkulierenden Unternehmen wissen, dass sich wirksamer Energieverbrauch unter dem Strich lohnt und außerdem noch eine ganze Reihe wertvoller Nebeneffekte hat: höhere Qualität und Zuverlässigkeit in energieeffizienten Fabriken, 6 bis 16 Prozent mehr Arbeitsproduktivität in Energie sparenden Büroräumen sowie 40 Prozent mehr Umsatz in architektonisch geschickt angelegten Kaufhäusern, die statt Kunst- hauptsächlich Tageslicht nutzen.

In den USA, obwohl in aller Welt nicht zu Unrecht als die schlimmsten Energieverschwender verschrien, wird derzeit pro Wirtschaftsleistung 47 Prozent weniger Energie aufgewendet als vor dreißig Jahren. Dadurch sind die Produktionskosten um 1 Milliarde pro Tag gesunken. Diese Einsparungen wirken wie eine riesige allgemeine Steuersenkung, die auch das amerikanische Haushaltsdefizit mildert. In Europa und Japan hingegen meint man irrigerweise, wie weiter unten geschildert, wirtschaftlich das Einsparpotenzial bereits ausgenutzt zu haben.

Die globale Entwicklung wird durch geringere Energiekosten keineswegs gebremst, ganz im Gegenteil. In jeder Phase der Energieerzeugung, -verteilung und -nutzung lässt sich zusätzlicher Wert schöpfen. Die Umwandlung von Kohle im Kraftwerk zu Strom für die Glühbirne zu Hause hat einen Wirkungsgrad von nur 3 Prozent. Der Großteil der in Kraftwerken verpufften Überschusswärme ließe sich profitabel recyceln; sie macht in den USA 20 Prozent mehr Energie aus, als insgesamt in Japan verbraucht wird.

Etwa 5 Prozent des Haushaltsstroms in den USA gehen in Computern, Fernsehern und anderen Geräten verloren, die ausgeschaltet sind. Die Energie, die durch schlecht konstruierte Stand-by-Schaltungen vergeudet wird, entspricht dem Output von mehr als einem Dutzend 1000-Megawatt-Kraftwerken bei voller Leistung (Deutschland vergeudet auf diese Weise ungefähr die Leistung zweier Kernkraftwerke). Insgesamt kostet diese unnötige Energieverschwendung die Amerikaner Hunderte Milliarden und die Weltwirtschaft mehr als 1 Billion Dollar pro Jahr; sie destabilisiert das Klima, ohne den geringsten Wert zu schaffen.

Sparhindernisse

Wenn Energieeinsparen so viel bringt, warum ist nicht jeder eifrig dabei? Ein Hindernis ist, dass viele Menschen Effizienz – mit weniger mehr erreichen – mit Einschränkung, Unannehmlichkeit oder Entbehrung verwechseln: weniger haben, schlechter leben, verzichten müssen. Außerdem erkennt der Energienutzer nicht, wie viel er profitieren kann, denn die gesparte Energie tritt nicht in spektakulären Mengen auf, sondern in Millionen unsichtbar kleiner Portionen. Den meisten Menschen fehlt einfach die Zeit, sich auf moderne Einsparmethoden zu konzentrieren, deren rasante Entwicklung sogar Experten überfordert.

In den USA ist die Energie obendrein scheinbar billig, weil sie mit Steuermitteln subventioniert wird. Die Regierung erklärt zwar die Förderung effizienter Energienutzung zur Priorität, lässt

aber diesen Worten kaum Taten folgen. Auch wirken zahlreiche tief verwurzelte Gewohnheiten und Regeln hemmend oder belohnen sogar Verschwendung. Dabei ließen sich all diese Hindernisse durch relativ einfache Veränderungen in Marktchancen verwandeln.

Bessere Effizienz ist zwar die zentrale Voraussetzung für ein umweltfreundliches Energiesystem, doch auch der Übergang zu Brennstoffen, die weniger Kohlenstoff emittieren, wird eine wichtige Rolle spielen. Die Weltwirtschaft befindet sich bereits auf dem richtigen Weg: In den letzten zwei Jahrhunderten sind kohlenstoffreiche Brennstoffe wie Kohle kohlenstoffärmeren Energieträgern wie Erdöl und Erdgas gewichen – oder erneuerbaren Energiequellen wie Solarenergie und Windkraft, die gar keinen Kohlenstoff abgeben. Heute machen Kohlenstoffatome weniger als ein Drittel des verbrannten Fossilbrennstoffs aus; der Rest ist klimaneutraler Wasserstoff.

Dieser Trend wird durch wirksamere Umwandlung, Verteilung und Nutzung von Energie noch verstärkt. So kann beispielsweise durch Kraft-Wärme-Kopplung – die kombinierte Erzeugung von Wärme und Strom – aus jeder in die Atmosphäre abgegebenen Tonne Kohlenstoff die doppelte Nutzleistung extrahiert werden. Insgesamt könnten diese Fortschritte den Gesamtausstoß von Kohlenstoff bis 2050 selbst bei einer wachsenden Weltwirtschaft drastisch senken.

Meinen Schwerpunkt lege ich auf den Aspekt, der den größten Ertrag verspricht: mehr Leistung aus jeder an Unternehmen und Konsumenten gelieferten Energieeinheit. Durch verbesserte ▷



Das Verbrennen fossiler Energieträger trägt nicht nur zur globalen Erwärmung bei – es ist vor allem pure Geldverschwendung. Bessere Energienutzung in Fabriken, Gebäuden, Fahrzeugen und Elektrogeräten würde den Verbrauch von Kohle und Erdöl senken, den Schaden für das Erdklima verringern und zugleich Unternehmen und Haushalten sehr viel Geld einbringen.

FOTO: CARY WOLINSKY; ILLUSTRATION: JEN CHRISTIANSEN

▷ Endverbrauchseffizienz werden Brennstoffbedarf, Umweltverschmutzung und Investitionskosten deutlich reduziert, da auf jedem Wegstück von der Produktion zum Verbraucher große Energiemengen verloren gehen (siehe Kasten auf gegenüberliegender Seite). So können selbst kleine Einsparungen beim Endverbrauch den erforderlichen Input am Anfang der Energiekette beträchtlich verringern.

Viele Energie sparende Produkte, die einst teuer und exotisch waren, sind preiswert und alltäglich geworden. Kompaktleuchtstofflampen kosten heute nur ein Fünftel des früheren Preises. Sie verbrauchen bis zu 80 Prozent weniger Energie als vergleichbare herkömmliche Glühbirnen und halten rund 12-mal länger. Fensterbeschichtungen, die Licht durchlassen und Wärme reflektieren, sind viel günstiger geworden. Tatsächlich kosten in wettbewerbsintensiven Gerätesparten – Motoren, Industriepumpen, Fernsehgeräte, Kühlschränke – Energie sparende Modelle teilweise nicht mehr als solche mit schlechtem Wirkungsgrad. Doch noch wichtiger ist eine stille konzeptionelle Revolution, die all das geschickt kombiniert.

Zum Beispiel: Wie viel Wärmeisolierung braucht ein Haus in einer kalten Klimazone? Die meisten Ingenieure würden mit dem Isolieren aufhören, sobald die zusätzlichen Materialkosten die längerfristig eingesparten Heizkosten übersteigen. Diese Rechnung lässt jedoch die Kapitalkosten des Heizsystems – Heizkessel, Rohre, Pumpen und so fort – außer Acht, die bei guter Isolierung gar nicht erst anfallen.

Nehmen wir mein 1984 fertig gestelltes Haus in Snowmass im US-Bundesstaat Colorado. Im Winter sinken die Temperaturen auf minus 44 Grad, und Frost kann es an jedem Tag des Jahres geben. Das Haus hat kein herkömmliches Heizungssystem; stattdessen ist das Dach mit einer 20 bis 30 Zentimeter dicken Schicht aus Polyurethanschaum isoliert, und in dem 40 Zentimeter dicken Mauerwerk stecken weitere 10 Zentimeter Isolierschaum. Die Doppelscheibenfenster kombinieren zwei oder drei transparente, Wärme reflektierende Folien mit isolierendem Krypton-Edelgas; dadurch halten sie Wärme so gut zurück wie 8 bis 14 Glasscheiben.

Zusammen mit Wärmerückgewinnung aus der Abluft wird der Gesamtverlust so stark verringert, dass er nur 1 Prozent höher liegt als die durch Sonneneinstrahlung sowie durch Geräte und Menschen im Haus erzeugte Wärme. Dieses minimale Defizit kann ich durch Spielen mit meinem Hund ausgleichen – der etwa 50 Watt Wärme erzeugt, aber auch 100 Watt, wenn man ihm einen Ball zuwirft – oder in den kältesten Nächten durch Verbrennen veralteter Energiestudien in einem Holzöfchen.

Solide Bilanz

Der Wegfall des Heizungssystems verringerte 1983 die Baukosten um damals 1100 Dollar. Ich investierte dieses Geld plus weitere 4800 Dollar in Geräte, mit denen ich die Hälfte des Wassers, 99 Prozent der Energie für Warmwasser und 90 Prozent des Haushaltsstroms einspare. Das 370 Quadratmeter große Gebäude, in dem auch die ursprüngliche Zentrale des Rocky Mountain Institute (RMI), einer von mir 1982 mitbegründeten gemeinnützigen Gruppe, untergebracht ist, verbraucht kaum mehr Strom als eine 100-Watt-Glühbirne. (Nicht enthalten ist darin allerdings der Verbrauch der Büromaschinen des Instituts.) Solarzellen erzeugen fünf- bis sechsmal so viel Strom, den ich an den Energieversorger verkaufe. Insgesamt ha-

DIE ENERGIEFRAGE

Das Problem

▶ Der Energiesektor der Weltwirtschaft arbeitet äußerst ineffizient. Kraftwerke und Gebäude verschwenden Unmengen von Wärme. Autos und Lkws nutzen nur einen Bruchteil der Kraftstoffenergie. Elektrogeräte vergeuden Strom – oft sogar in abgeschaltetem Zustand.

▶ Wenn nichts geschieht, wird der Verbrauch von Erdöl und Kohle weiter steigen und der Wirtschaft jährlich Hunderte Milliarden Dollar entziehen. Zugleich verschlimmern sich Klima-, Umwelt- und Versorgungsprobleme.

Die Lösung

▶ Effizientere Endnutzung ist die schnellste und einträglichste Art, Energie zu sparen. Viele Energie sparende Produkte kosten nicht mehr als solche, die viel verbrauchen. Der Bau von Wohnungen und Fabriken, die wenig Energie benötigen, ist oft billiger als konventionelles Bauen. Superleichte Fahrzeuge brauchen nur halb so viel Kraftstoff – bei gleicher Sicherheit und gleichem Kaufpreis.

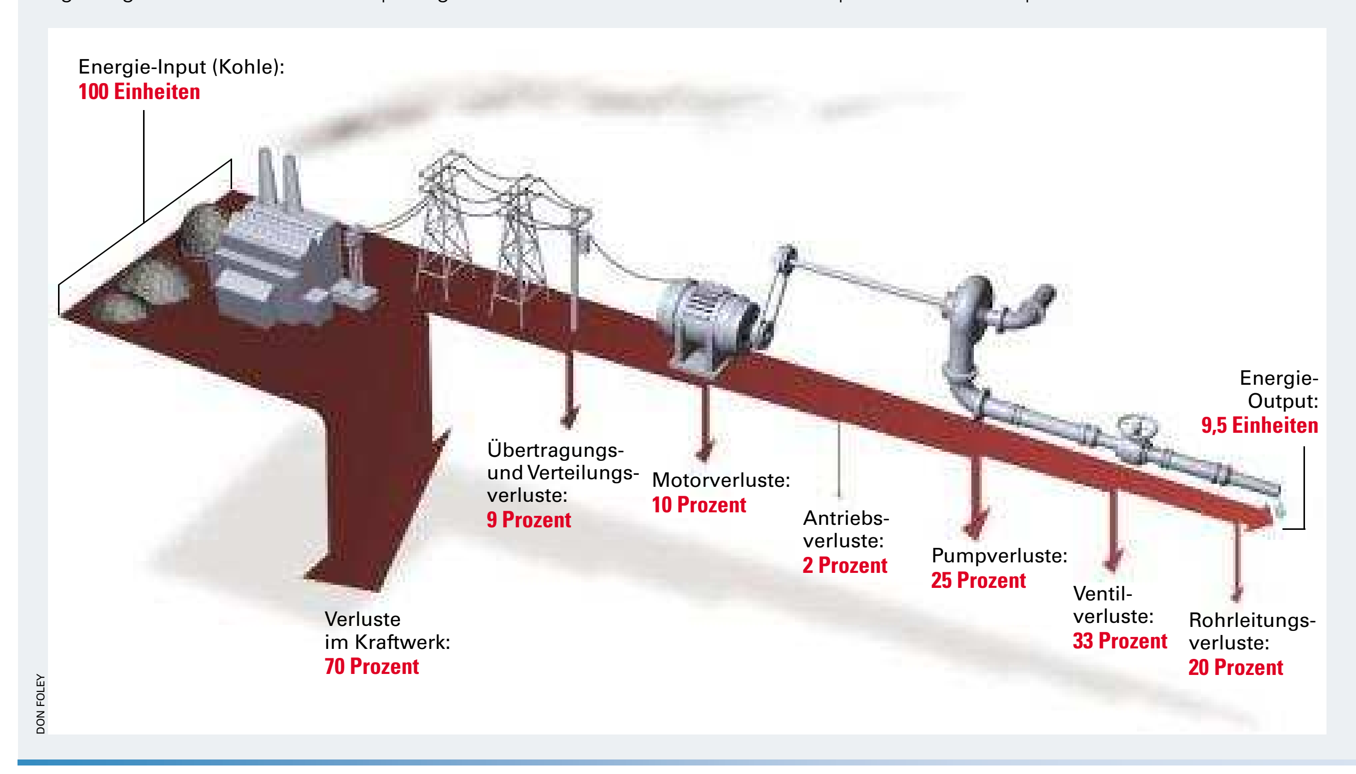
▶ Durch Energiesparen und die Nutzung erneuerbarer Energien könnte ein Industrieland wie die USA bis 2050 allmählich ganz ohne Erdöl auskommen. Auf einem freien Markt ohne Subventionen und Handelsschranken wären gewinnorientierte Unternehmen Vorreiter dieser Entwicklung.



SOLAR DESIGN ASSOCIATES, INC., S. STRONG

Wie Verluste sich summieren

Auf dem Weg vom Kraftwerk zur Fabrikpipeline schmälern Verluste die Primärenergie des Brennstoffs – hier willkürlich mit 100 Einheiten angesetzt – um mehr als 90 Prozent. Am Ende bleiben nur 9,5 Einheiten als Flüssigkeitsstrom durch das Fabrikrohr übrig. Umgekehrt führen kleine Einsparungen beim Endverbrauch zu großen beim Input. Wird zum Beispiel durch verringerte Reibung im Rohr eine Output-Einheit gespart, sinkt der erforderliche Brennstoff-Input um zehn Einheiten. Das senkt Kosten und Umweltbelastung des Kraftwerks und ermöglicht den Einsatz kleinerer und preiswerterer Pumpen und Motoren.



ben sich alle Energie sparenden Investitionen mit der Technologie von 1983 binnen 10 Monaten bezahlt gemacht; heutige Technologie wäre noch billiger.

In den 1990er Jahren führte Pacific Gas & Electric ein Experiment namens ACT2 durch: In sieben neuen und alten Gebäuden sollte mit kluger Konzeption bewiesen werden, dass große Verbesserungen preiswerter ausfallen können als kleine. So errichtete das Unternehmen in Davis (Kalifornien) ein neues Vorstadthaus, das im Sommer ohne Klimaanlage kühl blieb. Schätzungen zufolge vermag eine solche Bauweise, sofern sie häufig zum Einsatz kommt, die Baukosten um 1800 Dollar und die Wartungskosten über die gesamte Lebensdauer um 1600 Dollar zu senken.

1996 baute der thailändische Architekt Soontorn Boonyatikarn in der Nähe der tropisch heißen Hauptstadt Bangkok ein Haus, dessen Klimaanlage nur ein Siebtel der sonst üblichen Leistung braucht. Das dabei eingesparte Geld wurde für eine Isolierung von Dach, Wänden und Fenstern verwendet, die das Haus kühl hält (siehe Kasten S. 49). In all diesen Beispielen gilt das Prinzip: Baue nicht separate Komponenten für einzelne Vorteile ein, sondern optimiere das gesamte Gebäude durch vielfältige Verbesserungen.

Einfache Tricks

Dieser Systemansatz eignet sich auch für Büros und Fabriken. Bei einer 1997 in Shanghai errichteten Teppichfabrik senkten die Konstrukteure die für den Heizkreislauf nötige Pumpenergie durch zwei einfache Veränderungen um 92 Prozent. Erstens installierten sie große statt kleine Rohre; dadurch sank die Reibung und das System kam mit kleineren Pumpen und Motoren aus. Zweitens wurden zuerst die Rohre verlegt und erst dann die Geräte aufgestellt, die sie verbinden sollten. Die Flüssigkeit durchströmte daher kurze und gerade Rohre statt umständlich verschlungene, wodurch Reibung und Investitionskosten weiter sanken. Das ist nicht der letzte Schrei des Raketenzeitalters, sondern gute alte Ingenieurkunst vom Ende des 19. Jahrhunderts – und sie lässt sich vielfach anwenden.

Ein Team unseres RMI hat kürzlich Baupläne entwickelt, die Energieeinsparungen von 89 Prozent bei einem Rechenzentrum versprechen, etwa 75 Prozent bei einem Chemiewerk, 70 bis 90 Prozent bei einem Supermarkt und 50 Prozent bei einer Luxusyacht – und das alles zu geringeren Investitionskosten als bei herkömmlicher Bauweise. Das Team hat auch Nachrüstungen für bestehende Erdölraffinerien, Bergwerke und Mikrochip-Fabriken ausgearbeitet, die 40 bis 60 Prozent Energie sparen und sich binnen weniger Jahre amortisieren würden.

Der Transport von Personen und Gütern frisst in den USA 70 Prozent des Erdölverbrauchs und erzeugt ein Drittel der Kohlenstoffemissionen. Der Verkehrssektor gilt gemeinhin als der schwierigste Teil des Klimaproblems, ins- ▷

▷ besondere seit Hunderte Millionen von Menschen in China und Indien anfangen, Autos zu kaufen. Doch gerade in diesem Sektor stecken enorme Einsparpotenziale. Eine 2004 von meinem Team am RMI verfasste und vom Pentagon mitfinanzierte Analyse mit dem Titel »Winning the Oil Endgame« (Sieg im Öl-Endspiel) besagt, dass sich der Erdölverbrauch von Autos, Lkws und Flugzeugen um ein Drittel senken ließe – und zwar ohne Kompromisse bei Komfort, Sicherheit, Leistung und Preis –, wenn Leichtbaumaterialien geschickt mit Neuerungen bei Antrieb und Aerodynamik kombiniert würden.

Los vom Öl!



Millionen Barrel Erdöl werden die USA im Jahr 2025 jeden Tag verbrauchen, wenn die gegenwärtigen Trends sich fortsetzen.

13 Prozent der Treibstoffenergie erreichen die Autoräder.

70 Milliarden Dollar können ab 2025 jährlich eingespart werden, wenn Erdöl effizienter genutzt und durch andere Quellen ersetzt wird.

Noch 119 Jahre nach seiner Erfindung bleibt das Automobil ein kläglicher Energieverschwender. Lediglich 13 Prozent der im Treibstoff enthaltenen Energie kommen überhaupt bei den Rädern an; die anderen 87 Prozent entweichen als Wärme und Lärm aus Motor und Antrieb, verpuffen im Leerlauf oder werden für allerlei Schnickschnack verschleudert. Mehr als die Hälfte der an die Räder abgegebenen Energie erwärmt Reifen, Straßenbelag und Luft. Nur 6 Prozent der Treibstoffenergie beschleunigen tatsächlich das Auto – und beim Anhalten wird diese ganze Energie in Bremswärme umgewandelt. Da das Auto allein 95 Prozent der beschleunigten Masse ausmacht, dient letztlich weniger als 1 Prozent des Treibstoffs der Fortbewegung des Fahrers.

Physikalisch gesehen ist die Lösung klar: herunter mit dem Gesamtgewicht, das drei Viertel des Energieverlusts an den Rädern verursacht. Außerdem: Jede durch Gewichtsreduktion an den Rädern gesparte Energieeinheit spart zusätzliche sieben Einheiten ein, die sonst auf dem Weg zu den Rädern verloren gehen.

Lange hat man sich wegen Sicherheits- und Kostenbedenken nicht getraut, »schlankere« Wagen zu bauen, aber mit modernen Leichtmetalllegierungen und Verbundpolymeren kann das Auto radikal abnehmen, ohne bei Crashtests schlechter abzuschneiden. Kohlefaser-Verbundwerkstoffe absorbieren 6- bis 12-mal mehr Aufprallenergie pro Kilogramm als Stahl; das macht den Gewichtsnachteil eines solchen Leichtfahrzeugs bei einem Zusammenstoß mit einem doppelt so schweren Stahlfahrzeug mehr als wett.

Seit einigen Jahren können Karosserien aus Kohlefaser-Verbundwerkstoffen solchen aus Stahl durchaus Konkurrenz machen. Eine leichtere Hülle erlaubt kleinere – und billigere – Motoren. Weil die Montage von Kohlefaser-Autos keine Karosserie- oder Lackieranlagen erfordert, können die Fabriken kleiner und ihre Baukosten um 40 Prozent niedriger sein als sonst. Diese Einsparungen würden die höheren Kosten der Verbundwerkstoffe kompensieren. Insgesamt ließe sich mit Ultraleicht-Karosserien der Kraftstoffverbrauch heutiger Hybrid-Elektrofahrzeuge – die bereits halb so viel benötigen wie herkömmliche Autos – noch einmal halbieren, ohne dass sich am Verkaufspreis etwas ändern müsste. Sollten Verbundwerkstoffe nicht rechtzeitig zur Verfügung stehen, bieten sich für eine Übergangszeit neuartige Ultraleicht-Stähle als zuverlässige Alternative an. Der harte Wettbewerb auf dem Automarkt wird bei den Werkstoffen rasch die Spreu vom Weizen trennen; jedenfalls werden sich innerhalb der nächsten zehn Jahre supersparsame Ultraleicht-Autos von der großen Kfz-Flotte absetzen.

Obendrein könnte diese Schlankheitskur die Umstellung auf Brennstoffzellenautos vorantreiben, die statt mit Erdölprodukten mit Wasserstoff fahren (siehe »Schwerpunkt Wasserstoff«, SdW 6/2005, S. 86). Ein Auto, das dank halbem Gewicht und Luftwiderstand nur noch ein Drittel der üblichen Leistung auf die Räder bringen muss, braucht kaum mehr als 2 Liter Treibstoff auf 100 Kilometer – beziehungsweise eine Brennstoffzelle mit nur 35 Kilowatt Leistung. Das ist ein Drittel der üblichen Größe und daher sehr viel preiswerter herzustellen (siehe Kasten S. 52).

Leichter Vorreiter

Da das Fahrzeug außerdem nur ein Drittel des sonst benötigten Wasserstoffs mitführen muss, sind keine neuartigen Speicher erforderlich; kompakte Kohlefaser-Tanks nehmen genug Wasserstoff auf, um dem schlanken Fahrzeug eine Reichweite von 530 Kilometern zu gestatten. Daher wird der erste Autohersteller, der ultraleichte Modelle anbietet, das Rennen um die Brennstoffzelle gewinnen – und die gesamte Branche anspornen, in puncto Material und Herstellung ebenso innovativ zu werden wie einige Firmen bereits beim Antrieb.

Der RMI-Analyse zufolge könnte ein vollständiges Umstellen auf sparsame Fahrzeuge, Gebäude und Industrieprozesse den für 2025 prognostizierten Erdölverbrauch der USA von 28 Millionen Barrel pro Tag mehr als halbieren (1 Barrel entspricht 159 Litern). Damit würde er auf den Stand von vor 1970 schrumpfen. In einem realistischen Szenario könnte nur etwa die Hälfte dieser Einsparungen bis 2025 realisiert werden, da viele ältere Autos und LKWs weiterhin in Betrieb wären; Fahrzeugbestände erneuern sich relativ langsam. Doch noch vor 2050 könnte der Verbrauch von Erdöl in den USA allmählich auslaufen, indem man es doppelt so effizient nutzt sowie sukzessive durch alternative Energieträger ersetzt (siehe Bild S. 54).

Die Unternehmen profitieren von einer solchen Umstellung erheblich, denn das Einsparen eines Barrels Öl durch bes-

seren Wirkungsgrad kostet nur 12 Dollar, und das ist weniger als ein Fünftel des derzeitigen Rohölpreises. Außerdem könnten zwei Treibstoffe selbst dann eine starke Konkurrenz zum Erdöl darstellen, wenn dessen Preis auf weniger als die Hälfte des aktuellen Werts sinken würde. Die erste Alternative ist Ethanol aus Stroh oder Holz liefernden Pflanzen wie Rutenhirse und Pappel. In den USA ist derzeit Mais die Hauptquelle für Ethanol, das dem Benzin beigemischt wird. Doch holzige Pflanzen liefern die doppelte Ausbeute pro Tonne wie Mais, und das bei geringerem Investitionsaufwand und viel niedrigerem Energieeinsatz.

Die zweite Alternative ist Erdgas; es enthält weniger Kohlenstoff als Öl und wäre preiswerter und in größeren Mengen verfügbar, sobald der Strombedarf in Spitzenzeiten durch bessere Energienutzung sinken würde. Den Spitzenstrom erzeugen mit Erdgas betriebene Turbinen so wenig effizient, dass bereits 1 Prozent Stromeinsparung den Erdgasverbrauch der USA um 2 Prozent und den Gaspreis um 3 bis 4 Prozent senken würde. Das eingesparte Gas könnte dann das Erdöl entweder direkt ersetzen oder, was noch gewinnbringender und effizienter wäre, durch Umwandlung in Wasserstoff.

Die Vorteile des Ölausstiegs würden weit über die geschätzten Einsparungen von 70 Milliarden Dollar pro Jahr hinausgehen. Er würde die Kohlenstoffemissionen der USA um 26 Prozent ver- ▷

Wie ein Haus von selbst Energie spart

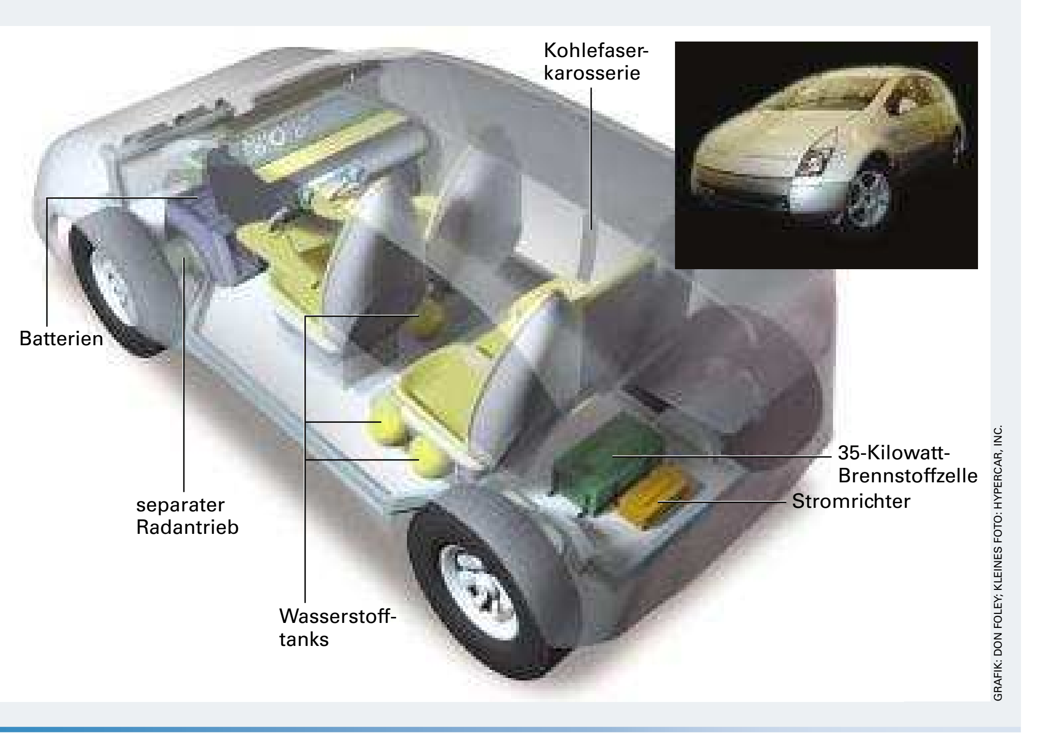
Wie kühlt man im tropischen Thailand ein Haus mit minimalem Stromverbrauch? Der Architekt Soontorn Boonyatikarn von der Universität Chulalongkorn verwendet Dachüberstände und Balkone, um seinem 350 Quadratmeter großen Haus in Pathumthani bei Bangkok Schatten zu spenden. Isolierung, eine luftdichte Außenhülle und Infrarot reflektierende Fenster halten die Hitze ab. Offene Wohnebenen und ein zentrales Treppenhaus fördern die Ventilation. Die Innenluft wird zum Abkühlen durch ein unterirdisches Rohr geschickt. Dadurch kommt die Klimaanlage mit einem Siebtel der sonst üblichen Kapazität aus. Die Abwärme ihrer Verdichter heizt das Warmwasser auf und spart so zusätzlich Energie.



GRAFIK: DON FOLEY; KLEINES FOTO: SOONTORN BOONYATIKARN, CHULALONGKORN UNIVERSITY

Schlankes Fahrzeug, sportlich und sparsam

Ultraleichte Pkws können schnell, geräumig, sicher und wirtschaftlich sein. Ein im Jahr 2000 vorgestellter fünfsitziger Prototyp namens Revolution wiegt nur 857 Kilogramm – weniger als halb so viel wie ein vergleichbares Auto herkömmlicher Bauart. Seine Kohlefaser-Karosserie schützt die Insassen selbst bei Zusammenstößen mit viel schwereren Fahrzeugen. Mit seiner 35-Kilowatt-Brennstoffzelle käme das Fahrzeug mit 3,4 Kilogramm Wasserstoff im Tank 530 Kilometer weit und könnte in 8,3 Sekunden auf 100 beschleunigen.



GRAFIK: DON FOLEY; KLEINES FOTO: HYPERCAR, INC.

ringern sowie sämtliche sozialen und politischen Kosten des Beschaffens und Verbrennens von Erdöl beseitigen: militärische Konflikte, Preisschwankungen, Subventionen im In- und Ausland, Umweltverschmutzung und so fort. Ein ölfreies Land braucht nicht um Öl zu kämpfen. Auch das Pentagon profitiert unmittelbar von besserer Energienutzung, weil dadurch Kosten und Risiken der Treibstoffversorgung für seine Truppen sinken. Die amerikanische Militärforschung hat die zivile Industrie durch die Einführung des Internets und des Global Positioning System (GPS) bereits gründlich verändert; nun sollte sie sich als Vorreiter bei der Entwicklung ultraleichter Werkstoffe hervortun.

Der Umstieg auf eine ölfreie Wirtschaft könnte sogar noch schneller gelingen als vom RMI prognostiziert, wenn die Politik nicht länger den Autoverkehr auf geradezu perverse Art fördern würde. Wenn Bund, Länder und Gemeinden aufhören, die Zersiedlung durch wuchernde Vorstädte zu unterstützen, können die meisten Menschen in einer Nachbarschaft leben, die in einem Radius von fünf Gehminuten alles Nötige bietet. Diese neue Stadtplanung spart nicht nur Treibstoff, sondern schafft auch stärkere Gemeinschaften und bessere Gewinnchancen für Erschließungsunternehmen – und ist obendrein nicht so gewaltsam wie andere Methoden der Verkehrsbegrenzung, etwa die drakonischen Benzin- und Kfz-Steuern, mit denen Singapur Verkehrszusammenbrüche wie in Bangkok zu vermeiden sucht.

Verbesserte Energienutzung spart nicht nur viel Elektrizität, sondern kostet auch weniger als die Kohle, mit der die US-Energieunternehmen derzeit die Hälfte des Stroms und 38 Prozent der Kohlenstoffemissionen produzieren. (In der BRD liegt Kohlestrom bei ebenfalls rund 50 Prozent und der Wirkungsgrad der Anlagen bei bis zu 45 Prozent.) Außerdem haben sich in den letzten Jahren praktikable Alternativen zu Kohlekraftwerken etabliert – vor allem durch erneuerbare Quellen wie Wind- und Solarenergie sowie dezentrale Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, die Strom zusammen mit Heizwärme für Wohnanlagen und Fabriken erzeugen. Weltweit übertrifft die Gesamtkapazität dieser Alternativen bereits die von Kernkraftwerken, und sie wächst sechsmal so schnell (siehe Bild S. 55). Der Trend ist umso eindrucksvoller, als die dezentrale Energieerzeugung etliche unfaire Wettbewerbsnachteile überwinden muss; meist wird sie viel weniger subventioniert als zentralisierte Kohle- oder Kernkraftwerke.

Wachsende Windkraft

Den wohl größten Erfolg feiert die Windkraft. Dank Massenproduktion und verbesserter Technik sind moderne Windturbinen groß – zwei bis fünf Megawatt Stromerzeugung pro Windrad –, äußerst zuverlässig und recht umweltfreundlich. Dänemark bezieht bereits ein Fünftel seines Stroms aus Windenergie, Deutschland etwa fünf Prozent. Jedes Jahr gehen in Spanien und in Deutschland weitere 2000 Megawatt Windkraft ans Netz; bis zum Jahr 2010 will Europa 22 Prozent seines Stroms und 12 Prozent seiner gesamten Energie aus erneuerbaren Quellen beziehen. Im Gegensatz dazu stagniert die Kernkraftnutzung weltweit und wird vermutlich mit der Zeit schrumpfen.

Oft wird gegen die Windkraft eingewandt, sie liefere zu unregelmäßig Strom; doch das hat sich nicht als ernsthafter Nachteil erwiesen. In jenen Regionen Europas, die an manchen Tagen ihren gesamten Strom aus Windkraft beziehen, haben die Energieversorger das Problem bewältigt, indem sie die Windräder geschickt verteilten, Windvorhersagen einkalkulierten und die Windenergie mit Wasserkraft und anderen Quellen kombinierten. Wind und Sonne ergänzen einander besonders gut: Was für Windenergie schlecht ist – ruhiges, sonniges Wetter –, ist gut für Solarenergie und umgekehrt. Passend kombinierte Windkraft- und Solaranlagen sind sogar zuverlässiger als herkömmliche Kraftwerke: Sie bestehen aus kleineren Modulen – den Windturbinen und Solarzellen –, bei denen die Wahrscheinlichkeit, dass sie alle auf einmal versagen, geringer ist; ihre

Kosten schwanken nicht heftig mit den Preisen für fossile Brennstoffe; und Terroristen attackieren viel eher einen Kernreaktor oder ein Ölterminal als einen Windpark oder eine Solaranlage.

Vor allem hat die erneuerbare Energie wirtschaftliche Vorteile. Im Jahr 2003 kostete Windenergie in den USA nur 2,9 Cent pro Kilowattstunde. Die Regierung subventioniert die Windkraft über eine steuerliche Förderung der Produktion, aber selbst ohne diese wäre die Windkraft mit 4,6 Cent pro Kilowattstunde noch immer billiger als subventionierter Strom aus neuen Kohle- oder Kernkraftwerken. Der US-Kongress ließ die befristete Subvention der Windkraft übrigens bereits mehrere Male auslaufen; hingegen genießen die fossilen Brennstoffe und die Kernkraft höhere und dauerhafte Subventionen.

Windenergie ist im Überfluss vorhanden: Windfarmen müssten nur einige Prozent der verfügbaren Landfläche in North und South Dakota beanspruchen und könnten damit den gesamten Strombedarf der USA kostengünstig decken. Solarzellen kosten zwar gegenwärtig pro Kilowattstunde mehr als Windturbinen, lassen sich aber trotzdem profitabel auf Gebäuden einsetzen, weil das Dachmaterial eingespart wird.

Auf den Flachdächern großer gewerblicher Bauten sind Solarzellen auch ohne Zuschüsse wettbewerbsfähig, wenn dem Eigentümer erlaubt wird, die Überschussenergie dann zu verkaufen, wenn sie am reichlichsten vorhanden und am wertvollsten ist – an sonnigen Nachmittagen. Sonnenenergie ist auch meist die billigste Methode, die zwei Milliarden Menschen in Entwicklungsländern mit Elektrizität zu versorgen, die keinen Zugang zu einem Stromnetz haben. Aber selbst in reichen Ländern kann ein Haus, das so viel Energie spart wie meines, den gesamten Strombedarf aus ein paar Quadratmetern Solarzellen beziehen, wenn die Sonnenbilanz stimmt; der Einbau der Anlage kostet weniger als der Anschluss an das Stromnetz.

Wie sich Klimaschutz bezahlt macht

Lohnende Energieeinsparung und wettbewerbsfähige erneuerbare Energien können die bedrohliche Arithmetik des Klimawandels umkehren, der sich desto mehr beschleunigt, je mehr fossile Brennstoffe wir verfeuern. Genau besehen überholt die effiziente Energienutzung sogar das Wirtschaftswachstum. Zwischen 1977 und 1985 zum Beispiel wuchs das Bruttoinlandsprodukt (BIP) der USA um 27 Prozent, während der Ölverbrauch um 17 Prozent fiel; im selben Zeitraum nahmen die Ölimporte um 50 Prozent ab, aus dem Persischen Golf sogar um 87 Prozent.

Die erneuerbaren Energien sind stets stärker gewachsen als das BIP: Weltweit verdoppelt sich die Solarenergie alle zwei Jahre und die Windenergie alle drei. Wenn sowohl die Effizienz als auch die erneuerbaren Energien schneller wachsen als die Wirtschaft, dann sinken die Kohlenstoffemissionen und die globale Erwärmung verlangsamt sich. Das verschafft uns mehr Zeit für die Entwicklung noch besserer Technologien, die den restlichen Verbrauch fossiler Brennstoffe ersetzen, oder für Verfahren, die den aus Verbrennungsvorgängen freigesetzten Kohlenstoff einfangen, bevor er die Atmosphäre belastet.

Im Gegensatz dazu ist die Kernkraft eine langsame und viel teurere Lösung. Eine Kilowattstunde aus einem Kernkraftwerk kostet mindestens dreimal so viel wie ihre Einsparung durch bessere Effizienz. Daher ersetzt jeder Dollar, der für Energieeinsparung ausgegeben wird, mindestens dreimal so viel Kohle wie die Investition in Kernenergie – und macht sich viel schneller bezahlt, weil der Bau von Reaktoren sehr lange dauert. Das Umlenken öffentlicher und privater Investitionen von Marktgewinnern zu Marktverlierern führt nicht nur zu Fehlzuweisungen von Finanzkapital, sondern verschlimmert das Klimaproblem durch Übernahme einer weniger wirksamen Lösung.

Zum Glück gilt für die globale Erwärmung, dass es billiger ist, ihr gegenzusteuern, als sie zu ignorieren. Da Energiesparen profitabel ist, wird es vom Markt belohnt. Wirtschaftsfachmann Skip Laitner von der amerikanischen Umweltschutzbehörde rechnet vor, dass zwischen 1996 und Mitte 2005 der mittlere Energieverbrauch pro Dollar BIP dank kluger Entscheidungen von Unternehmen und Konsumenten sowie wegen des Übergangs zu einer mehr auf Information und Dienstleistungen beruhenden Wirtschaft um 2,1 Prozent pro Jahr gesunken ist – fast dreimal so schnell wie in den zehn Jahren davor. Allein diese Veränderung deckte im letzten Jahrzehnt ▷

den Zuwachs der Energienachfrage zu 78 Prozent; nur für den Rest kamen vermehrte Energielieferungen auf.

Die USA erreichten diesen Fortschritt ohne technische Umwälzungen oder eine neue Energiepolitik. Das Klimaproblem entstand auf Grund von Millionen falscher Entscheidungen über Jahrzehnte hinweg; doch auch die Stabilisierung des Klimas lässt sich durch Millionen vernünftiger Entscheidungen erreichen – durch den Kauf sparsamerer Lampen oder Autos, durch besseres Abdichten der Wohnungen, durch Abschaffen subventionierter Verschwendung und Schaffung von Anreizen für erwünschte Resultate, indem beispielsweise Architekten und Ingenieure für Einsparungen statt für Ausgaben bezahlt werden.

Belohnte Verschwender

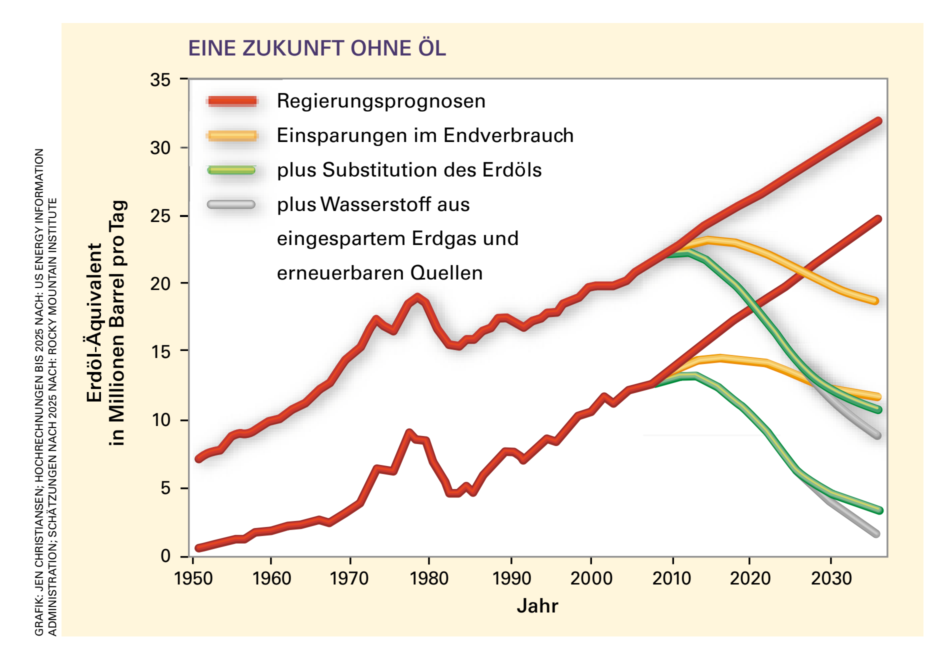
Eine gute Regierung soll steuern, statt gegen den Strom zu rudern, doch die offizielle Politik bugsiert unser Energieschiff seit Jahren in die falsche Richtung. Die gegenwärtige Energiepolitik schadet der Wirtschaft und dem Klima, indem sie das Marktgeschehen manipuliert und gewisse Technologien einseitig bevorzugt. Der beste Kurs wäre, jeder Methode zur Energieerzeugung oder -einsparung eine faire Marktchance zu geben, zu ehrlichen Preisen, unabhängig von der Art der Investition, der eingesetzten Technologie, ihrer Größe oder ihres Eigentümers.

Zum Beispiel sollten dezentrale Stromquellen wie Solarzellen auf Gebäudedächern einfach ans Netz gehen dürfen, wenn moderne technische Sicherheitsstandards eingehalten werden. Zwar erlauben 31 US-Bundesstaaten, dass die Energieversorger den Strom der Privaterzeuger zum selben Preis kaufen, den sie ihnen für gelieferten Strom berechnen, doch meist wird dieser Wettbewerb künstlich beschränkt oder verzerrt. (In Deutschland regelt das »Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien« Einspeisung und Vergütung.)

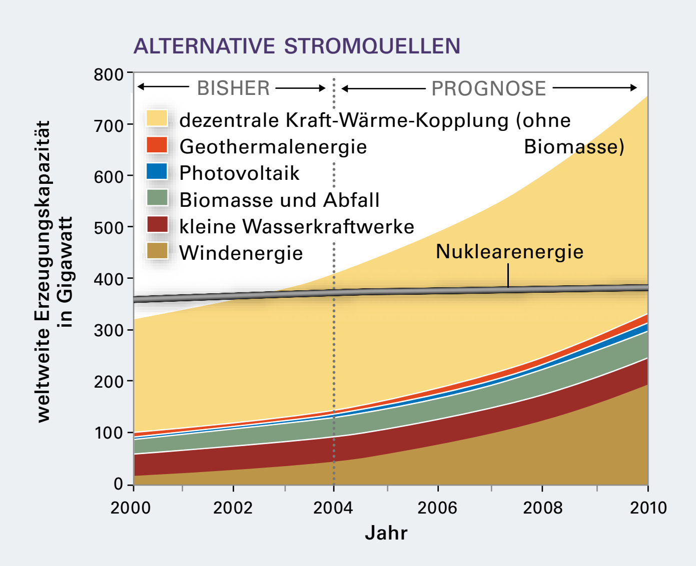
Das allergrößte Hindernis auf dem Weg zur effizienten Nutzung von Strom und Gas ist jedoch, dass die meisten Länder der Welt – und alle US-Bundesstaaten außer Kalifornien und Oregon – die Energieversorger belohnen, wenn sie mehr Energie verkaufen, und sie bestrafen, wenn sie die Kosten ihrer Kunden senken. Glücklicherweise lässt sich dieses Problem leicht beheben: Die Aufsichtsbehörden müssen die Anreize so ausrichten, dass sie die Gewinne von den Energieumsätzen abkoppeln und den Versorgern erlauben, einen Teil der durch gesenkte Energiekosten erzielten Einsparungen zu behalten.

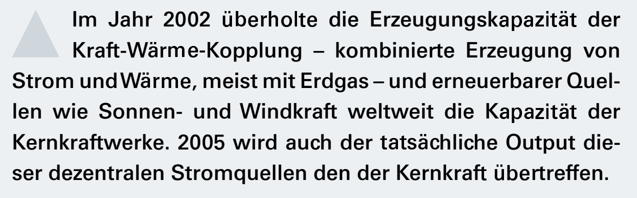
Die amerikanische Autoindustrie tut sich schwer, Sprit sparende Fahrzeuge auf den Markt zu bringen, denn weder die Bilanzen noch die Manager fördern visionäre Innovationen. Außerdem besteuern die USA den Verbrauch so gering und subventionieren die Herstellung so stark, dass Benzin billiger ist als Mineralwasser. Allerdings ist eine höhere Kraftstoffsteuer nicht unbedingt die beste Lösung. In Europa hat die hohe Besteuerung eher den Effekt, das Autofahren einzuschränken, als die Effizienz neuer Fahrzeuge zu steigern, denn die Treibstoffkosten werden von anderen Ausgaben der Autobesitzer überlagert, und die meisten Käufer berücksichtigen nur den Wert der Treibstoffersparnis während der ersten paar Jahre. In den USA sank der durchschnittliche Verbrauch neuer Autos und leichter Lkws durch in den 1970er Jahren beschlossene Standards zwar von 15 Litern pro 100 Kilometer im Jahr 1978 auf 10,8 Liter im Jahr 1987, stieg aber seither wieder auf 11,34 Liter. Die Regierung schätzt, dass die Autoindustrie in den nächsten zwanzig Jahren den Verbrauch ihrer Fahrzeuge gegenüber 1987 um nur 0,2 Liter pro 100 Kilometer senken wird. Zudem verabscheuen die Hersteller diese Standards als Einschränkung der freien Wahl und umgehen sie geschickt, indem sie mehr Fahrzeuge verkaufen, die als leichte Lkws klassifiziert sind und mehr Kraftstoff verbrauchen dürfen. Die unwirtschaftlichsten Leicht-Lkws genießen sogar spezielle Subventionen.

Die wirksamste Gegenmaßnahme ist, auf Neuwagen mit hohem Verbrauch eine Gebühr zu erheben, die den Käufern sparsamer Modelle als Rabatt zugute kommt. Wird diese Umlage für jede Fahrzeugklasse separat durchgeführt, damit keine Benachteiligung größerer Modelle entsteht, so erweitert dies die Wahlfreiheit des Kunden, statt sie einzuengen. Umlagen fördern Innovationen, ersparen den Käufern Geld und steigern die Gewinne der Autohersteller. Solche Maßnahmen auf Bundesebene könnten die Einführung fortschrittlicher Technologien für Pkws, Lkws und Flugzeuge beschleunigen, und zwar ohne Steuern, Subventionen oder neue Bundesgesetze.



Der Erdölverbrauch und -import der USA lässt sich Gewinn bringend senken, wenn die Effizienz von Fahrzeugen, Gebäuden und Industrieanlagen verdoppelt wird (gelbe Linien). Zusätzlich könnten konkurrenzfähige Alternativen wie Biokraftstoff und eingespartes Erdgas (grüne Linien) sowie Wasserstoff (graue Linien) den Ölverbrauch bis 2050 praktisch auf null bringen.




Im Jahr 2002 überholte die Erzeugungskapazität der Kraft-Wärme-Kopplung – kombinierte Erzeugung von Strom und Wärme, meist mit Erdgas – und erneuerbarer Quellen wie Sonnen- und Windkraft weltweit die Kapazität der Kernkraftwerke. 2005 wird auch der tatsächliche Output dieser dezentralen Stromquellen den der Kernkraft übertreffen.

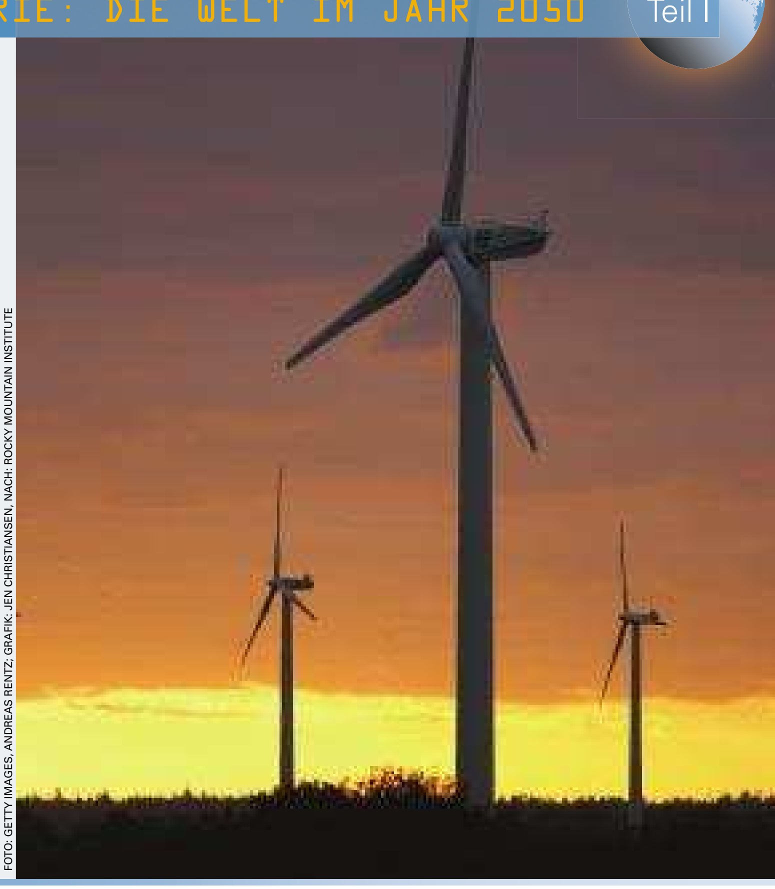


FOTO: GETTY IMAGES, ANDREAS RENTZ; GRAFIK: JEN CHRISTIANSEN, NACH: ROCKY MOUNTAIN INSTITUTE

In Europa und Japan ist das Haupthindernis für Energieeinsparungen die irrige Ansicht, man habe bereits die wichtigsten Ziele erreicht. Obwohl diese Länder fast doppelt so effizient wirtschaften wie die USA, haben sie noch einen langen Weg vor sich. Doch die größten Möglichkeiten stecken in den Entwicklungsländern, die im Schnitt dreimal weniger wirtschaftlich mit Energie umgehen als die USA. In diesen Ländern sind Motoren, Lichtquellen und andere Geräte gang und gäbe, die extrem viel Energie verschleudern. Ihr Energiesektor verschlingt gegenwärtig ein Viertel aller Entwicklungsgelder und lähmt damit wichtige Projekte.

Daran sind die Industrieländer mitschuldig, da sie Energieschleudern in die Dritte Welt exportieren. Doch der Export von Ineffizienz ist weder moralisch noch ökonomisch vertretbar. Vielmehr sollten die reichen Nationen den armen helfen, eine Energie sparende Infrastruktur aufzubauen, damit Kapital für dringend nötige Investitionen frei wird. Die Herstellung effizienter Lampen und Fenster erfordert tausendmal weniger Kapital als der Bau von Kraftwerken und Stromnetzen zur Erfüllung derselben Aufgaben, und die Investitionen machen sich zehnmal schneller bezahlt.

In China und Indien weiß man bereits, dass eine rasch wachsende Wirtschaft nicht lange wettbewerbsfähig bleiben kann, wenn ihre Energieverschwendung Geld, Können und Gesundheit aufs Spiel setzt. China hat sich das ehrgeizige, aber realistische Ziel gesetzt, auf dezentrale erneuerbare Energiequellen und Erdgas umzusteigen; das Land verfügt über enorme Gasvorräte und wird voraussichtlich riesige Lager in Ostsibirien anzapfen. Außerdem verfolgt es seit 2004 eine Energiestrategie, die auf Entwicklungssprünge und rasch verbesserte Effizienz bei Neubauten, Fabriken und Konsumgütern setzt. Auch versucht China den explosiv wachsenden Erdölverbrauch zu bremsen; ab 2008 wird es den Verkauf vieler amerikanischer Autotypen mit hohem Spritverbrauch verbieten. Falls die US-Autofirmen nicht schnell genug innovativ werden, könnten in zehn Jahren supereffiziente Wagen aus China den amerikanischen Markt erobern und eine Million Arbeitsplätze in den USA gefährden.

Die rasche Globalisierung der Weltwirtschaft schafft neuartige Anreize für Energieinvestitionen. Wenn die Regierungen Handelsschranken beseitigen und die Dynamik freier Märkte nutzen, werden sich von selbst Initiativen durchsetzen, die Wohlstand erzeugen, das Klima schützen und durch den Wechsel von fossilen Brennstoffen zu preiswerteren Alternativen echte Versorgungssicherheit schaffen. Dieses technologisch innovative Zusammenwirken von Wirtschafts-, Umwelt- und Sicherheitsinteressen erzeugt nachhaltigen Überfluss und birgt die Chance einer gerechteren, reicheren und friedlicheren Welt. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Amory B. Lovins ist Mitbegründer und Geschäftsführer des Rocky Mountain Institute, einer gemeinnützigen Organisation mit Sitz in Snowmass (US-Bundesstaat Colorado), sowie Vorsitzender von Fiberforge, einer Technikfirma in Glenwood Springs (Colorado). Seit über dreißig Jahren berät der Physiker Industrie und Regierungsbehörden in aller Welt, hauptsächlich zu Energieproblemen und deren Auswirkung auf Umwelt, Entwicklung und Sicherheit. Er hat darüber zahlreiche Bücher und Artikel publiziert und viele Auszeichnungen erhalten.

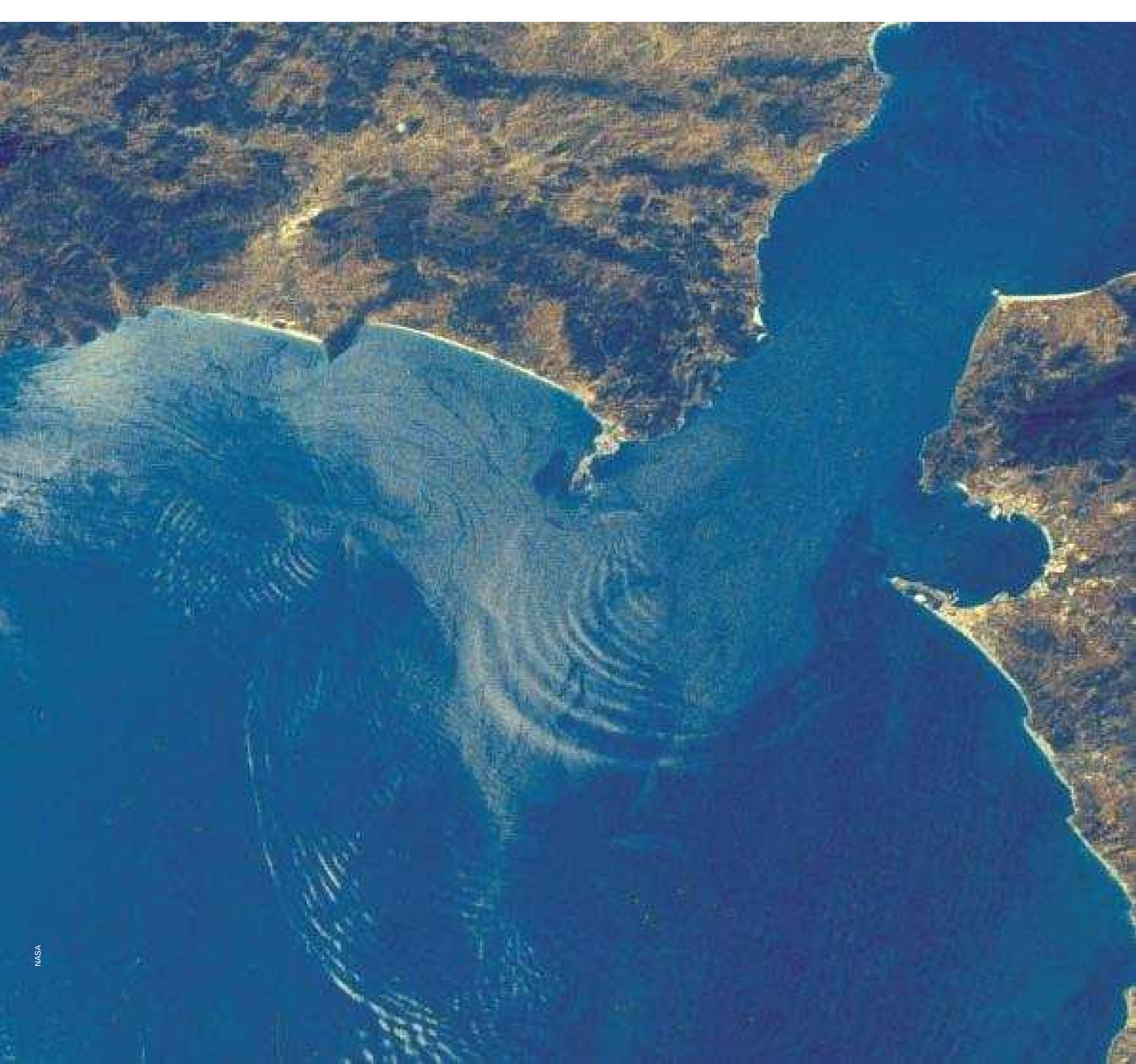
Hypercars, hydrogen and the automotive transition. Von A. B. Lovins und D. R. Cramer in: International Journal of Vehicle Design, Bd. 35, S. 50, 2004

Winning the oil endgame. Von A. B. Lovins et al. Rocky Mountain Institute, 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Wellen unter den Wellen

Seltsame Wogen, die unter der Meeresoberfläche hin- und herschwappen, scheinen dafür zu sorgen, dass der Festlandsockel überraschend sanft zur Tiefsee hin abfällt.



NASA

Von David A. Cacchione und Lincoln F. Pratson

Viele von uns verbringen ihren Urlaub am Meer. Stellen Sie sich einmal vor, Sie kämen zum Strand und das Wasser wäre verschwunden. Nach Überwindung des ersten Schocks fänden Sie es wahrscheinlich genauso reizvoll, den zuvor verborgenen Meeresgrund zu erforschen wie in der Brandung zu plantschen. Also würden Sie kurzerhand in Ihr Auto steigen, vorsichtig losfahren und sich fragen, welche Überraschungen wohl auf Sie warten mögen.



Zunächst passiert nicht viel; denn Sie überqueren den Kontinentalschelf. Er besteht aus Sedimenten, die vom Land abgetragen wurden, und bildet eine fast horizontale Ebene. Nur hier und da gibt es Rippelfelder oder Dünen, die durch die Bewegung von Wellen und Strömungen in dem verschwundenen Ozean entstanden sind. Links und rechts erspähen Sie vielleicht ehemalige Flussbetten, die sich während früherer Eiszeiten eingegraben haben. Damals hatte sich, weil so viel Wasser in den Gletschern gebunden war, der Meeresspiegel um über hundert Meter abgesenkt, sodass der Festlandsockel frei lag.

Auf der Weiterfahrt gelangen Sie schließlich an den Schelfrand. Wie bald das geschieht, hängt davon ab, an welcher Küste Sie sich befinden: Vor Zentralchile zum Beispiel wäre es schon nach fünf Kilometern so weit, fast überall vor der US-Ostküste dagegen erst nach mehr als hundert. Am Schelfrand stoppen Sie und steigen aus, um den grandiosen Blick auf sich wirken zu lassen. Vor Ihnen liegt der Kontinentalhang, der etwa 3000 Höhenmeter zum Tiefseeboden hinunter abfällt.

Seine Topografie ist etwas abwechslungsreicher als die des Schelfs. An einigen Stellen geht es ziemlich steil und holprig abwärts: meist dort, wo untermeerische Schluchten – teils gewaltiger als der Grand Canyon – den Kontinentalhang zerschneiden. Zwischen diesen Abgründen senkt sich der Meeresboden jedoch überraschend sanft ab: Würden Sie wieder in Ihr Auto einsteigen und einen solchen Hang hinunterfahren, wäre es ein Gefühl wie auf einer Passstraße in den Alpen.

Dabei sollte der Kontinentalhang eigentlich viel steiler sein. Wenn Sedimentpakete unter Wasser nur der Schwerkraft ausgesetzt sind, können sie ohne Weiteres stabile Abhänge mit einer Neigung von 15 Grad und mehr bilden. Doch rund achtzig Prozent der Schelfränder weltweit fallen mit weniger als acht Grad ab und ihr durchschnittlicher Neigungswinkel liegt bei nur etwa drei Grad. Gäbe es allein die ständige Sedimentzufuhr vom Festland, sollte das Gefälle mit der Zeit zunehmen. Also müssen natürliche Kräfte existieren, welche die Kontinentalhänge flach halten. Wir glauben, dass ein wesentlicher – bislang unerkannter – Faktor so genannte interne Gezeiten sind: weit gehend unsichtbare Wogen, die im Rhythmus von Ebbe und Flut tief unter dem Meeresspiegel durch die Ozeane pulsieren.

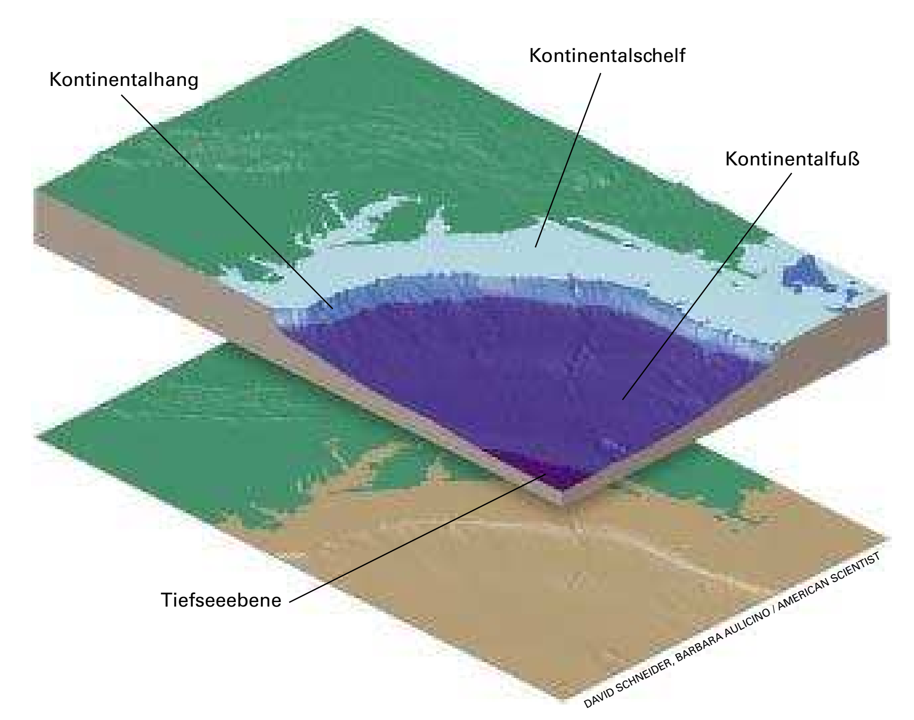
◀ **Interne Meereswellen lassen sich in der Straße von Gibraltar beobachten. Auf diesem Foto, das Astronauten 1984 bei strahlendem Sonnenschein von einer Raumfähre aus machten, entsprechen die hellen Ringe glatten, spiegelnden Arealen und die dunklen Bögen gekräuselten, matten Bereichen. Sie pausen die Wellen im Untergrund durch, weil diese die Rauigkeit der Wasseroberfläche beeinflussen. Da der Blick von Süden nach Norden geht, liegt Spanien unten rechts und Marokko oben links.**

Meereswogen ohne Wind

Wellen unter den Wellen – kann es das geben? Tatsächlich ist das Phänomen gar nicht so seltsam, wie es auf den ersten Blick anmutet. Die vertrauten Oberflächenwellen wandern längs der Grenze zwischen zwei fließfähigen Medien, nämlich Luft und Wasser. Stellen Sie sich jetzt vor, das obere Medium wäre eine Flüssigkeit anstatt eines Gases. Was geschähe? Auch in diesem Fall könnten im Grenzbereich Wellen auftreten – allerdings würden sie sich nicht ganz so verhalten wie gewohnt. Wenn die untere Flüssigkeit nur wenig dichter als die obere wäre, hätten sie zum Beispiel erstaunlich große Amplituden. Außerdem würden sie sich wie in Zeitlupe bewegen. (Dieselben Effekte sind in den kleinen Wellentanks zu beobachten, die es in Kuriositätenläden zu kaufen gibt, gewöhnlich neben den Lavalampen, siehe Bild S. 59.)

Analoge Grenzschichtwellen gibt es innerhalb des Ozeans. Sie bilden sich meist an der Basis der so genannten Durchmischungszone: der obersten Wasserschicht, die fortwährend durch Wind und Wellen umgewälzt wird und in ihren physikalischen Eigenschaften daher ziemlich homogen ist. Darunter verändert sich die Temperatur (und damit die Dichte) des Meerwassers abrupt – wie Gerätetaucher oft überrascht feststellen.

Die Basis der Durchmischungszone befindet sich gewöhnlich in einer Tiefe von weniger als hundert Metern. Den weiter unten gelegenen Kontinentalhang können die hier entstehenden Grenzschichtwellen deshalb nicht formen. Aber sie sind auch nicht die einzigen. Darun- ▷



Vor der Küste eines Festlands – hier im Nordosten der USA – erstreckt sich der Schelf, der über den Kontinentalhang und -fuß in die Tiefseeebene übergeht. Nur bei starker Überhöhung wird das Relief auf einer geschummerten Karte erkennbar (oben). Ohne eine solche Verzerrung erscheint die Topografie des Meeresbodens ziemlich flach (unten). Das Gefälle am Kontinentalhang beträgt in der Regel nur wenige Grad.

ter treten interne Wellen auf, die keine bestimmte Grenzschicht zwischen verschieden dichten Körpern benötigen. Vielmehr entstehen sie einfach deshalb, weil das Wasser mit der Tiefe allmählich dichter wird.

Um das zu verstehen, sollten Sie sich für einen Moment vorstellen, Sie würden einen kleinen Bereich im Meer von seiner Umgebung isolieren, indem Sie etwa einen Ballon in einer bestimmten Tiefe mit Wasser füllen. Sich selbst überlassen, bliebe dieser frei schwebend auf demselben Niveau. Was aber geschähe, wenn Sie ihn nach oben zögen, in Bereiche geringerer Dichte? Da das Wasser in seinem Innern dann dichter wäre als seine neue Umgebung, würde der Ballon von der Schwerkraft zurück nach unten gezogen. Doch durch den Schwung, den er beim Absinken erhielte, schösse er über seine ursprüngliche Position hinaus in tiefere Regionen, deren Dichte höher wäre als seine eigene. Folglich würde er wieder aufsteigen und diese vertikale Oszillation so lange fortsetzen, bis die Reibung ihn zum Stillstand brächte.

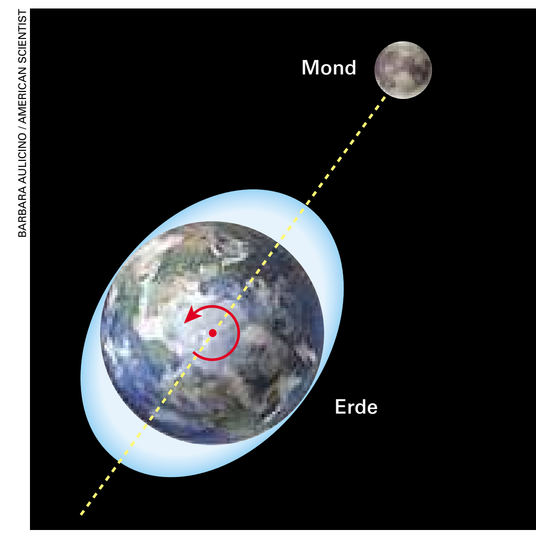
Mit dem Bild dieses auf und ab tänzelnden Ballons vor Augen können Sie sich leicht vorstellen, wie es zu solchen Pendelbewegungen innerhalb der Meere kommt. Angetrieben werden sie etwa von den Gezeiten. Diese erzeugen nicht nur die als Ebbe und Flut bekannten periodischen Schwankungen des Meeresspiegels, sondern rufen auch eine Strömung hervor, die sich über den Ozeanboden bewegt. Dabei trifft sie manchmal auf untermeerische Erhebungen. Von solchen topografischen Hindernissen nach oben abgelenkt, können Gezeitenströme leicht in Schaukelbewegungen verfallen, die sich in großen Wellen von ihrem Ursprungsort fortpflanzen. Wie das Wechselspiel zwischen Ebbe und Flut, das sich zweimal am Tag wiederholt, folgen sie einem Zwölf-Stunden-Rhythmus. Ozeanografen sprechen deshalb von »halbtäglichen internen Gezeiten«.

Versuche im Wassertank

Der norwegische Arktisforscher und Friedensnobelpreisträger Fridtjof Nansen entdeckte schon Ende des 19. Jahrhunderts die ersten Beispiele dafür im Nordpolarbecken. Doch erst in den 1960er Jahren erkannten Ozeanografen darin ein allgemeines Phänomen, das weltweit auftritt. Nun wurde auch klar, dass interne Wellen gewaltige Mengen an Energie enthalten und das Meerwasser regelmäßig durchmischen, während sie an den Kontinentalhängen entlangschwappen.

Die bewegten 1960er Jahre waren für die Geowissenschaften außerordentlich fruchtbar – brachten sie doch unter anderem das fundamentale Konzept der Plattentektonik hervor. Damals äußerte auch einer von uns (Cacchione) gemeinsam mit seinen Doktorvätern Carl Wunsch und John Southard vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge erstmals die Vermutung, dass interne Wellen über geologische Zeiträume hinweg den Meeresboden formen könnten. Grundlage dieser Hypothese waren Berechnungen von Wunsch, der zu den bedeutendsten physikalischen Ozeanografen seiner Zeit zählte. Demnach sollten interne Wellen, die sich an submarinen Hängen entlang aufwärts bewegen, Strömungen am Meeresboden hervorrufen, die stark genug wären, Material abzutragen und zu verlagern. Diese Theorie musste allerdings noch unter kontrollierten Laborbedingungen überprüft werden. Cacchione wollte das im Rahmen seiner Doktorarbeit tun.

Dazu füllten er und Wunsch einen großen rechteckigen Tank, der den Ozean simulierte, mit Wasser, dessen Salzgehalt – und damit Dichte – mit der Tiefe zunahm. An einem Ende war auf halber Höhe an einem horizontalen Stab ein senkrecht stehendes Brett angebracht. Indem die Forscher dieses »Paddel« hin- und herdrehten, erzeugten sie eine Serie interner Wellen. Diese wanderten zum gegenüberliegenden Ende des Tanks, wo eine schräg gestellte Kunststoffplatte den Kontinentalhang verkörperte. Dabei erreichten die horizontalen Wasserge-



Im kleinen Wellentank aus dem Kuriositätenladen, der zwei nicht mischbare Flüssigkeiten unterschiedlicher Dichte (eine durchsichtig, eine blau) enthält, lassen sich interne Wellen beobachten. Ihre Amplituden sind größer als bei Oberflächenwellen ähnlicher Wellenlänge, und sie bewegen sich wie in Zeitlupe. Sie können auch in einer homogenen Flüssigkeit entstehen, wenn ein vertikaler Gradient in der Dichte vorliegt.



AMERICAN SCIENTIST

schwindigkeiten an der Oberfläche und am Grund des Beckens ihr Maximum, während in der Mitte keinerlei Bewegung stattfand.

Mit eigenen Augen konnten Wunsch und Cacchione beobachten, wie sich die internen Wellen über dem nachgestellten Hang deutlich veränderten. Sobald sie auf die Kunststoffschräge trafen, nahm ihre Amplitude zu und die Wellenlänge ab. Sie wurden also höher und schmaler, während die Wassergeschwindigkeiten stiegen – ganz ähnlich wie bei der Brandung, die an den Strand klatscht. In einigen Fällen entwickelten sich große, turbulente Flutwellen mit steilem Bug, die sich wie eine Wand auftürmten und den Hang hinaufwanderten, bevor sie sich überschlugen und in sich zusammenstürzten. Diese sich brechenden internen Wogen verursachten oft ein erhebliches Klatschen und eine Rückströmung, durch die im echten Ozean der Grund abgespült würde.

Mit ihrem Probetank erforschten Cacchione und Wunsch auch eine spezielle, »kritische« Situation, bei der die Energie der internen Wellen in einer schmalen Zone entlang der geneigten Kunststoffplatte weit gehend aufgezehrt wurde. Damals war dieses Phänomen noch nicht theoretisch beschrieben worden. Die experimentellen Untersuchungen zeigten jedoch, dass in diesem kritischen Fall die Wassergeschwindigkeiten drastisch zunahmen und die interne Brandung an dem nachgestellten Hang sich enorm verstärkte – weit über die Werte bei anderen Testläufen hinaus.

Dadurch konnten, wie Cacchione und Southard in weiteren Laborexperimenten zeigten, Sedimente vom Meeresgrund aufgewirbelt und Riefen erzeugt werden. Aus diesen Ergebnissen schlossen Cacchione, Wunsch und Southard, dass interne Wellen auch im wirklichen Ozean im Stande wären, die Sedimentation zu beeinflussen, sofern die kritische Bedingung an Kontinentalhängen erfüllt wäre. Den Beweis dafür an Ort und Stelle zu führen, schien ihnen allerdings zu schwierig.

Erschütterungen am Meeresgrund

Erst Jahre später machte Cacchione seine erste persönliche Erfahrung mit den Auswirkungen echter interner Wellen im Ozean. Es war bei einer Tauchfahrt mit dem Atom-U-Boot NR-1 der US-Marine im Hydrographer Canyon. Dieser erstreckt sich unmittelbar südlich von Kap Cod und ist eine von vielen Schluchten, die den dortigen Kontinentalhang zerschneiden. Während Cacchione und der bekannte Meeresbiologe Bruce Heezen eifrig den Untergrund kartierten und Fotos schossen, erschütterten wiederholt starke Strömungen das Gefährt. Sie erreichten Geschwindigkeiten von bis zu einem halben Meter pro Sekunde in Bodennähe und kehrten etwa alle zwölf Stunden ihre Richtung um.

Im Gegensatz zu anderen Atom-U-Booten besitzt NR-1 kleine Fenster. So konnten die Wissenschaftler mit eigenen Augen beobachten, wie die starken Strömungen immer wieder Schlamm aufwirbelten. Zeitgleich mit dem Auftreten von Ebbe und Flut trübte sich dadurch jeweils für etwa eine Stunde der Blick auf den sonst klar erkennbaren Meeresgrund. Dieses Erlebnis bestärkte Cacchione in der Überzeugung, dass interne Wellen tatsächlich Sediment am Meeresboden verfrachten. So beschloss er, seine Untersuchungen zu dem Phänomen wieder aufzunehmen.

Mit Tauchgängen an vielen Orten sowie zahlreichen Messwerten von Instrumenten, die am Grund verankert waren, ließen sich Vorkommen und Kraft der internen Gezeiten seither umfassend dokumentieren – sowohl in submarinen Schluchten als auch an sanfter abfallenden Stellen des Meeresbodens. Beispielsweise verfolgten Forscher der Universität von Washington in Seattle zwischen 1995 und 1999 mit Sonden in etwa 450 Meter Wassertiefe die Vorgänge am oberen Kontinentalhang vor Nordkalifornien. Wie sich zeigte, waren während der fünf Untersuchungsjahre durchweg interne Gezeiten für die stärksten Strömungen in Bodennähe verantwortlich. Mit Geschwindigkeiten bis zu 40 Zentimeter pro Sekunde wälzte sich dabei flutwellenartig kälteres Wasser hangaufwärts und misch- ▷

Hauptursache interner Wellen im Meer sind die Gezeiten. Der Wechsel zwischen Ebbe und Flut im ungefähr sechsstündigen Rhythmus beruht darauf, dass unter dem Einfluss des Monds zwei ausgeprägte Ausbuchtungen im Niveau des Meeresspiegels entstehen (hier der Deutlichkeit halber stark überhöht), unter denen die Erde rotiert.

te die Schichten am Meeresgrund kräftig durch. Ähnliches registrierten Ozeanografen an vielen anderen Orten – so vor der Hawaii-Insel Oahu in etwa 460, vor Virginia in rund 1100 und am Fuß des Kontinentalhangs südwestlich von Irland in ungefähr 3000 Meter Tiefe.

Im Lauf der Zeit häuften sich so die Belege dafür, dass interne Gezeiten bodennahe Strömungen verursachen, die stark genug sind, um die Sedimentation zu verhindern und manchmal sogar bereits abgelagertes Material wieder wegzuschwemmen. Das bewog uns dazu, unsere bisher nur im Labor geprüfte Hypothese, wonach submarine Wellen die Entwicklung von Kontinentalhängen entscheidend mitbestimmen, endlich auch in der Natur zu testen. Selbstverständlich wussten wir, dass viele andere Prozesse diesen Bereich des Meeresbodens beeinflussen – angefangen von den langsamen Bewegungen der tektonischen Platten bis hin zum gelegentlichen Großreinemachen durch Trübeströme. Solche submarinen Erdrutsche treten auf, wenn der Meeresboden an einer steilen Stelle plötzlich nachgibt und ein schlammiges Gemisch aus Sediment und Wasser den untermeerischen Hang hinabschießt.

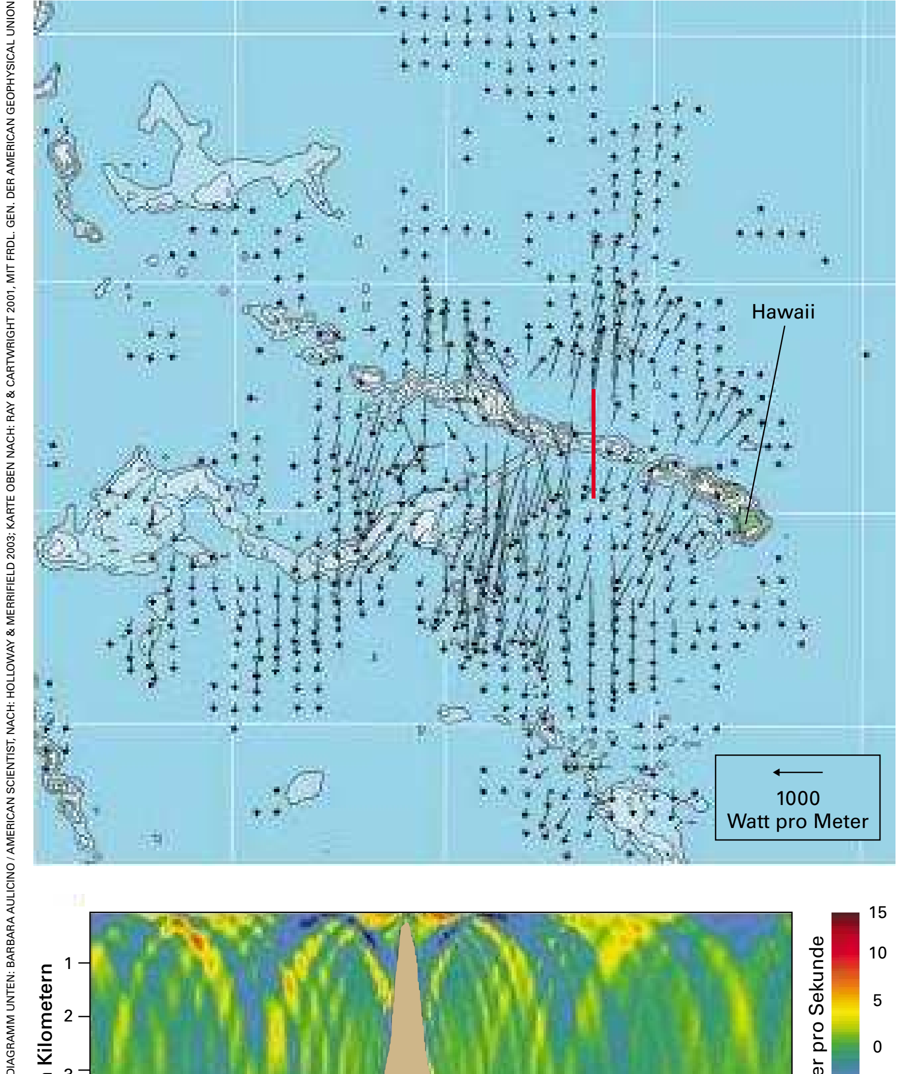
Geschwindigkeit, Häufigkeit und Ausmaß dieser Vorgänge variieren von einer Region zur anderen, was es ziemlich schwierig macht, ihren allgemeinen Einfluss auf die Formung der Kontinentalhänge abzuschätzen. Dagegen bilden die internen Gezeiten eine absolut konstante Größe: Tag für Tag streichen sie über die Kontinentalhänge rund um die Welt – in einigen Gebieten schon seit mehr als 100 Millionen Jahren. Damit sind sie fast so allgegenwärtig wie die Schwerkraft. Liegt es nicht nahe, dass sie auch für das allgemein zu geringe Gefälle des Kontinentalhangs sorgen?

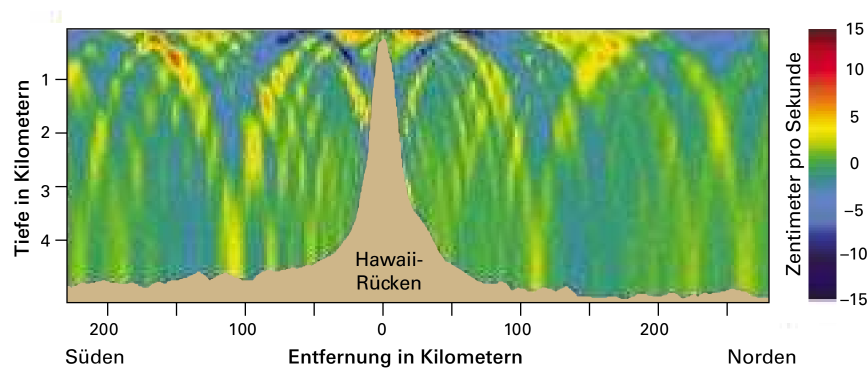
Eine Frage des Winkels

Vor zwei Jahren begannen wir, dieser Frage ernsthaft nachzugehen. Um unsere Strategie zu verstehen, muss man eine Besonderheit interner Gezeiten kennen: Die von ihnen transportierte kinetische Energie kann sich – anders als bei Oberflächenwellen – nicht nur horizontal, sondern auch vertikal und in jeder Richtung dazwischen ausbreiten. Der Winkel (gegenüber der Horizontalen), in dem das geschieht, heißt charakteristischer Winkel. Er hängt von drei Faktoren ab: der Frequenz (in unserem Fall zwei Zyklen pro Tag), der geografischen Breite und dem Dichtegradienten des Wassers. Ist er größer als das Gefälle des Meeresbodens, pflanzt sich die Energie der internen Gezeiten bis ins Flachwasser hinein fort, indem sie zickzackförmig zwischen der Basis der Durchmischungszone und dem Meeresboden hin und her läuft (Bild rechts oben). Übersteigt die Neigung des Untergrunds dagegen den charakteristischen Winkel, wird die Energie – nach einmaligem Abprallen an der Basis der Durchmischungszone – vom Boden ins offene Meer zurückgeworfen.

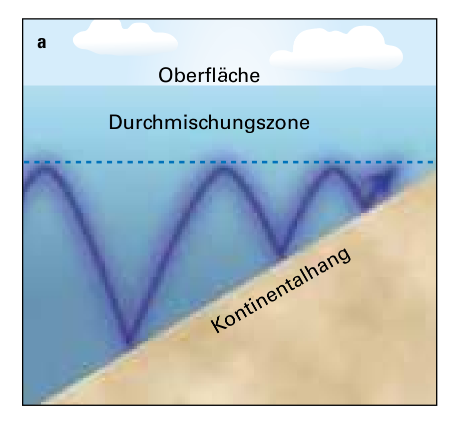
Zwischen diesen beiden Extremen liegt die kritische Situation, die Cacchione und Wunsch im Labor untersucht hatten. Hier entspricht der charakteristische Winkel genau dem Gefälle des Kon-

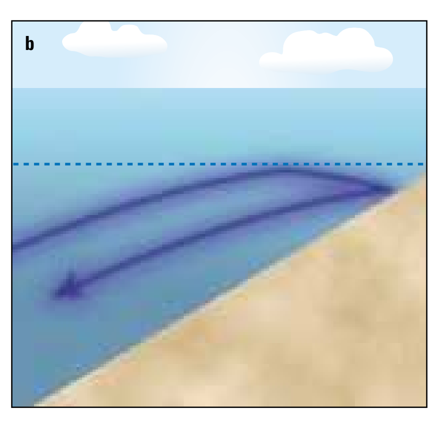
DIAGRAMM UNTEN: BARBARA AULICINO / AMERICAN SCIENTIST, NACH: HOLLOWAY & MERRIFIELD 2003; KARTE OBEN NACH: RAY & CARTWRIGHT 2001, MIT FRDL. GEN. DER AMERICAN GEOPHYSICAL UNION

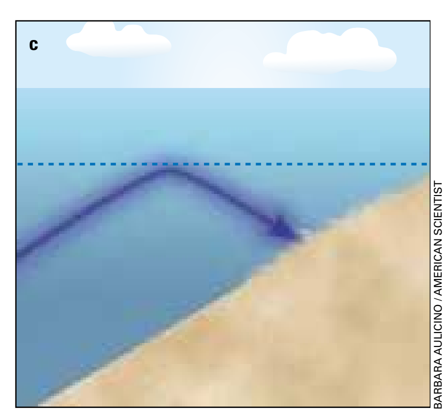




Interne Meereswellen entstehen, wo horizontale Gezeitenströme auf submarine Erhebungen treffen – etwa auf den Hawaii-Rücken. Anhand von Spuren an der Oberfläche ließ sich der durch interne Gezeiten verursachte Energietransport von dieser Schwelle weg dokumentieren (oben). Computersimulationen für ein Nord-Süd-Profil (roter Strich) zeigen, dass sich die kinetische Energie der internen Wellen – ausgedrückt durch ihre Geschwindigkeit – in Form von Strahlen fortpflanzt, die sich auf arkadenartigen Bahnen bewegen (unten).







BARBARA AULICINO / AMERICAN SCIENTIST

Die Wirkung eines Strahls aus interner Gezeitenenergie am Kontinentalrand hängt von seinem »charakteristischen Winkel« ab. Ist dieser größer als die Hangneigung (a), oszilliert der Strahl zwischen Meeresboden und Basis der Durchmischungszone und dringt bis zur Küste vor. Unterschreitet der charakteristische Winkel das Gefälle (b), wird der Strahl am Untergrund zurück in die Tiefsee reflektiert. Sind beide Winkel jedoch gleich (c), bleibt die Energie am Meeresboden gefangen und kann Sedimente aufwirbeln.

tinentalhangs. Unter diesen Umständen wird die Energie der internen Gezeitenwelle am Boden aufgefangen. Die Strömung erreicht ihre Maximalgeschwindigkeit und vermag folglich Teilchen im Wasser besonders gut in der Schwebe zu halten. Demnach könnten interne Gezeiten die Sedimentation an einem Hang verhindern, wenn ihre Energie sich exakt parallel zur Oberfläche fortpflanzt.

Auf Grund der Dichtestruktur der Ozeane bewegt sich der charakteristische Winkel für submarine Wellen typischerweise zwischen zwei und vier Grad. Nun weisen Kontinentalhänge weltweit im allgemeinen ein Gefälle von etwa drei Grad auf – was ziemlich genau dem Wert entspricht, bei dem die bodennahen Strömungen durch interne Gezeiten am stärksten sind. Ist das bloßer Zufall? Wohl kaum. Unserer Ansicht nach verhindern die Bodenströmungen durch interne Gezeiten, dass über den Rand des Schelfs gespülte Sedimente sich am Kontinentalhang ablagern und dessen Gefälle über den charakteristischen Winkel hinaus ansteigt.

Um diesen Gedanken zu überprüfen, machten wir zusammen mit Andrea S. Ogston, einer Kollegin an der Universität von Washington in Seattle, die Probe aufs Exempel. Wir verglichen den charakteristischen Winkel der internen Gezeiten und die Neigung des Kontinentalhangs an zwei Stellen, wo der Ozeanboden bis ins Detail kartiert ist: vor der Küste Nordkaliforniens und vor dem südlichen New Jersey. Die beiden Lokalitäten eignen sich ideal für den Test, weil sie sich in mehreren wichtigen Punkten unterscheiden.

So ist der Hang vor Nordkalifornien Teil eines schmalen Kontinentalrands an der Grenze zwischen zwei kollidierenden tektonischen Platten. Durch diesen Zusammenstoß, bei dem sich die eine Platte unter die andere schiebt, wird der Meeresboden unablässig verformt. Dabei kommt es oft zu Erdbeben, die manchmal submarine Erdrutsche auslösen. Im Gegensatz dazu markiert der Hang vor New Jersey den Rand eines breiten Festlandsockels, der sich im relativ ruhigen Inneren einer tektonischen Platte befindet. Erdbeben sind hier weitaus seltener und schwächer, und tektonische Verformungen gibt es seit mehr als 100 Millionen Jahren praktisch nicht mehr.

Ein weiterer bedeutsamer Unterschied zwischen den beiden Regionen betrifft die Herkunft der Ablagerungen an ihrem Untergrund. Die nordkalifornischen Flüsse Mad und Eel gehören zu den sedimentreichsten in den Vereinigten Staaten, und ein bedeutender Teil ihrer Fracht gelangt bis zum nahe gelegenen Kontinentalhang. Vor der Küste von New Jersey lagert sich dagegen nur wenig Material ab. Hier ist der Kontinentalhang von sehr feinen Sedimenten bedeckt, die vom Schelf abgetragen und über seinen Rand hinausgespült wurden.

Die beiden Gebiete unterscheiden sich auch in den ozeanografischen Bedingungen. Historische Messreihen zeigen, dass der Dichtegradient am Konti- ▷

Experimente im Wassertank (oben) demonstrieren die Bedeutung der Geometrie für die Übertragung der internen Gezeitenenergie auf dem Kontinentalhang. Ist die Neigung der Kunststoffschräge etwas geringer als der charakteristische Winkel der internen Wellen, entsteht eine sich aufsteilende Flutwelle, die den Hang hinaufläuft und sich dann bricht (unten links). Stimmen beide Winkel überein, verteilt sich die Energie großenteils in Form wirbelartiger Turbulenzen am Boden entlang (unten rechts).



FOTOS UNTEN: DAVID A. CACCHIONE; GRAFIK: BARBARA AULICINO / AMERICAN SCIENTIST

nentalhang im Atlantik vor New Jersey im Jahresverlauf stärker variiert als im Pazifik vor Nordkalifornien. Entsprechend größer sind die jahreszeitlichen Änderungen in der Geometrie der internen Gezeiten.

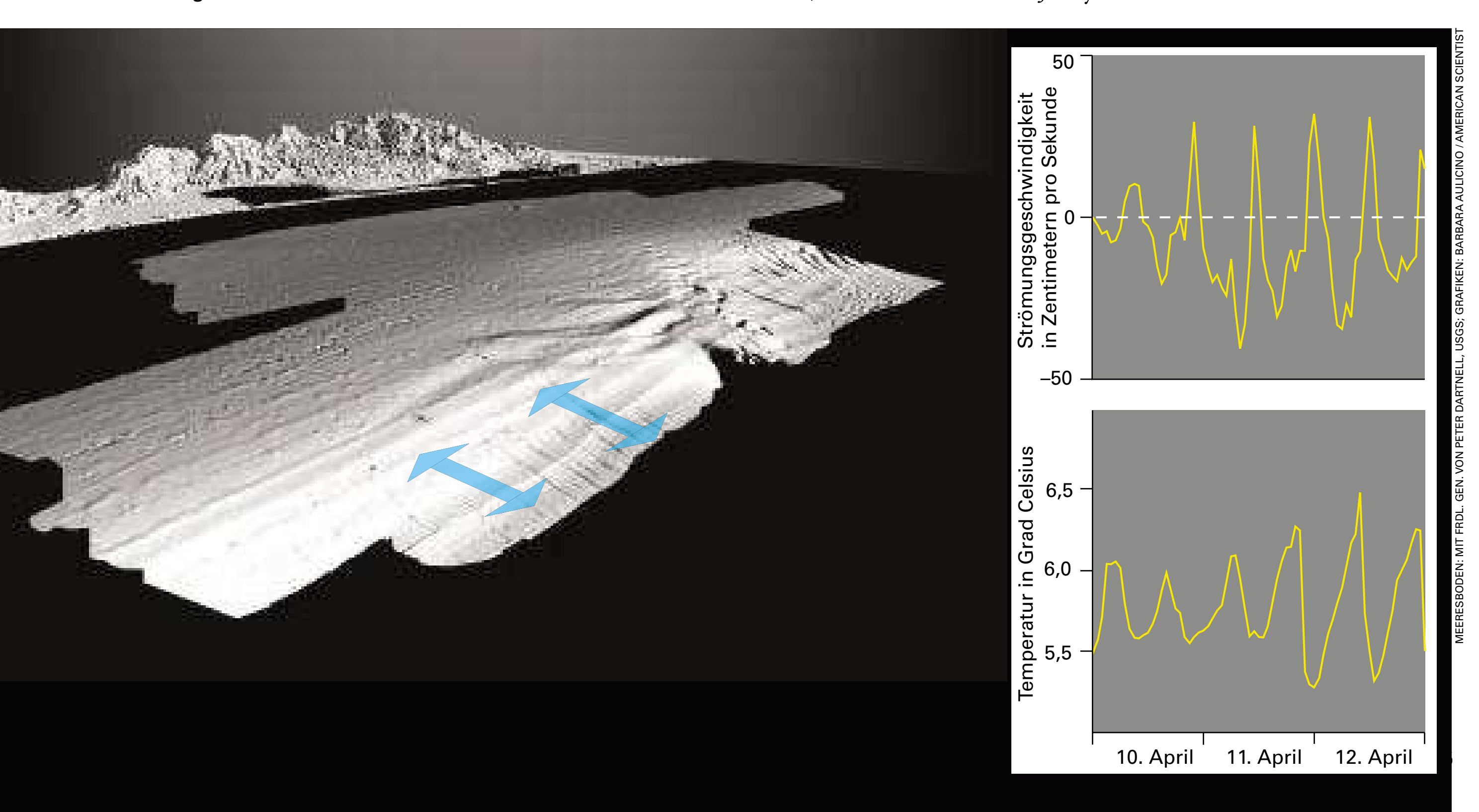
Die Kernfrage war nun, ob die charakteristischen Winkel an diesen beiden Orten mit dem Gefälle des Kontinentalhangs übereinstimmen. Aus Messreihen der Wassertemperatur und des Salzgehalts, zusammengestellt von der National Oceanic and Atmospheric Administration, berechneten wir in den zwei Untersuchungsgebieten die durchschnittliche Dichtestruktur des Ozeans. Daraus ließen sich die charakteristischen Winkel für die internen Gezeiten ableiten und über die Jahreszeiten mitteln. Diese Durchschnittswerte stimmten an beiden Orten fast oder sogar exakt mit dem mittleren Gefälle des jeweiligen Kontinentalhangs überein: rund zwei Grad in Nordkalifornien und etwa vier Grad im südlichen New Jersey.

Mit diesem ersten Erfolg aber gaben wir uns noch nicht zufrieden. Wir wollten die Übereinstimmung zwischen dem charakteristischen Winkel der internen Gezeiten und dem Gefälle des Kontinentalhangs auch im Detail prüfen. Dabei kam uns zu Hilfe, dass für unsere beiden Untersuchungsgebiete hoch aufgelöste Karten des Meeresbodens zur Verfügung stehen. Im Rahmen eines Programms des US-Amts für Marineforschung namens Strataform (für *strata formation on continental margins*, also Schichtbildung an Kontinenträndern) haben Wissenschaftler vom Geologischen Dienst der USA und von mehreren Universitäten mit einem Flächensonar das Gelände genauestens vermessen. Bei dieser Methode fährt ein Forschungsschiff, unter dessen Rumpf eine Reihe von akustischen Wandlern montiert ist, über das zu kartierende Gebiet. Die Sonargeräte senden gerichtete Schallwellen fächerförmig zum Meeresboden hinab. Auf diese Weise können die Techniker an Bord die Wassertiefe über einen breiten Streifen unter dem Schiff kartieren.

Auch die charakteristischen Winkel der internen Gezeiten waren leicht zu ermitteln. Wir konnten sie für die Punkte auf einem engmaschigen geografischen Gitternetz berechnen, indem wir historische sowie aktuelle Messungen von Temperatur und Salzgehalt des Wassers heranzogen. Die erhaltenen Werte mit der Hangneigung des Meeresbodens an eben diesen Stellen zu vergleichen, war dann kein Kunststück mehr.

Die Ergebnisse erwiesen sich als nicht ganz so eindeutig wie bei der allgemeinen Analyse. Trotzdem untermauerten sie unsere Vermutung, dass interne Gezeiten die Neigung des Kontinentalhangs entscheidend mitbestimmen. So entspricht das Gefälle des Meeresgrunds vor New Jersey in Tiefen zwischen 200 und 2000

Am Kontinentalhang gibt es jeweils Bereiche, wo das Gefälle kleiner als der charakteristische Winkel der internen Gezeiten ist (blau), mit ihm übereinstimmt (grün) oder ihn übersteigt (rot). Da dieser Winkel im Jahresverlauf variiert, muss man zwischen der Situation im Winter (oben) und im Sommer (unten) unterscheiden. Am Kontinentalhang vor Nordkalifornien (links) erfüllen zu beiden Jahreszeiten nur wenige Abschnitte die »kritische« Bedingung, bei der die Neigung des Meeresbodens dem charakteristischen Winkel der internen Gezeiten entspricht. Vor New Jersey (rechts) dagegen erreichen fast alle Hangbereiche irgendwann im Jahr die kritische Situation: die relativ steilen Wände untermeerischer Schluchten im Winter und die flacheren Zwischenregionen im Sommer.



Ein Abschnitt des Meeresbodens vor der Küste Nordkaliforniens wurde sehr genau kartiert (links). Am Grund verankerte Sonden registrierten hier periodische Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeit und Wassertemperatur (rechts). Demnach flutet alle zwölf Stunden ein Schwall kälteren Wassers hangaufwärts und schwappt wieder zurück (blaue Pfeile). Wie die genaue Analyse des Temperatur- und Geschwindigkeitsverlaufs ergab, erzeugen interne Gezeiten die Flutwellen, die mit hohem Tempo den Hang hinaufrauschen und sich brechen.

MEERESBODEN: MIT FRDL. GEN. VON PETER DARTNELL, USGS; GRAFIKEN: BARBARA AULICINO / AMERICAN SCIENTIST

Nordkalifornien

New Jersey

5 Kilometer

50 Kilometer

Winter

Sommer

0 1 2

Verhältnis zwischen Hangneigung und charakteristischem Winkel

DAVID SCHNEIDER, BARBARA AULICINO / AMERICAN SCIENTIST

Metern über weite Bereiche genau oder annähernd dem charakteristischen Winkel der internen Gezeiten zu der einen oder anderen Jahreszeit. Im Winter gilt das für viele submarine Schluchten – zum Beispiel für den zentralen Teil des Hudson Canyon, wo bekannt ist, dass interne Gezeiten starke Strömungen verursachen. Bei den flacheren Abschnitten dazwischen nähert sich der charakteristische Winkel zu anderen Jahreszeiten dem Gefälle an. So entspricht er im Sommer der Neigung von großen Teilen des Hudson-Schuttfächers, einer Fläche unmittelbar südlich des Hudson Canyon, wo kaum Erosion stattfindet und die Sedimentation vorherrscht. An solchen Schauplätzen sollten sich interne Gezeiten am stärksten auswirken. Die Befunde am Hudson-Schuttfächer bestätigen das.

Mit Einschränkungen passt auch der Kontinentalhang vor Nordkalifornien zu unserer Theorie. Allerdings sind die Verhältnisse dort diffiziler. Wegen der tektonischen Verformungen entlang der US-Westküste haben Teile des Hangs in den zentralen und südlichen Bereichen unseres Untersuchungsgebiets ein sehr variables Relief, das die noch andauernde tektonische Hebung und Faltung sowie häufige untermeerische Rutschungen widerspiegelt. Trotzdem neigen sich Abschnitte des Hangs in Tiefen zwischen 200 und 450 Metern genau oder annähernd im charakteristischen Winkel. Die Stärke der hier gemessenen Bodenwasserströmungen legt nahe, dass interne Gezeiten zumindest in einem Teil des Kontinentalhangs die Sedimentation und damit das Gefälle bestimmen.

Sicherlich sind hier (und nicht nur hier) auch andere Prozesse am Werk. Dazu zählen vor allem Trübeströme, die von Zeit zu Zeit von Erdbeben ausgelöst werden und große Mengen Sediment in tiefere Ozeanregionen verfrachten können. Dennoch glauben wir, dass es primär die internen Gezeiten sind, die im Großen und Ganzen die Kontinentalhänge formen. Dafür spricht ihre Allgegenwart und Beständigkeit über geologische Zeiträume hinweg.

Wir wollen unsere Analysen demnächst auf Kontinentalränder in anderen Teilen der Welt ausdehnen. So hoffen wir unsere Theorie weiter erhärten zu können. Aber auf Überraschungen muss man immer gefasst sein. Vielleicht stellt sich das bisherige Bild, das mit den Befunden am Schelf vor Nordkalifornien und New Jersey so erfreulich harmoniert, doch als zu simpel heraus. Oder es erweist sich tatsächlich als universal gültig. Die Zeit und die Gezeiten werden es zeigen. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE





David A. Cacchione (oben) hat 1970 in Ozeanografie promoviert. Als Marineoffizier arbeitete er damals beim US-Amt für Marineforschung, dessen Abteilung in Boston er später leitete. 1975 verließ er das Militär und wechselte zum Geologischen Dienst der USA in Menlo Park (Kalifornien). Seit 1998 ist er im Ruhestand. **Lincoln F. Pratson** hat 1993 an der Columbia-Universität in New York in Geologie promoviert. Heute ist er Professor für Sedimentäre Geologie an der Duke-Universität in Durham (North Carolina).



On the spring-neap variability and age of the internal tide at the Hawaiian Ridge. Von O. E. Holloway und M. A. Merrifield in: Journal of Geophysical Research, Bd. 108, S. 1, 2003

Internal wave breaking at concave and convex continental slopes. Von S. Legg und A. J. Adcroft in: Journal of Physical Oceanography, Bd. 33, S. 2224, 2003

The shaping of continental slopes by internal tides. Von D. A. Cacchione, L. F. Pratson und A. S. Ogston in: Science, Bd. 296, S. 724, 26. 4. 2002

Estimates of internal tide energy fluxes from Topex/Poseidon altimetry: Central North Pacific. Von R. D. Ray und D. E. Cartwright in: Geophysical Research Letters, Bd. 28, S. 1259, 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

DIE KARTOFFEL

Die tolle Knolle

Auch wenn es das Supermarktregal kaum glauben lässt – Kartoffeln gibt es in hunderten Varianten.

Von Stefanie Reinberger

Was der Bauer nicht kennt, das isst er nicht! Als Preußenkönig Friedrich II. 1744/45 Saatkartoffeln verteilen ließ, um einer Hungersnot vorzubeugen, landeten viele später auf dem Müll – die Bauern hatten aus Unkenntnis die giftigen Beeren (siehe Bild) verzehrt. Trotz des königlichen »Kartoffelbefehls« von 1756 kam der Anbau schleppend in Gang. Doch der Alte Fritz ließ angeblich Soldaten an den Feldern postieren und demonstrierte damit: Diese Knollen sind wertvoll.

Heute gehört *Solanum tuberosum*, so der fachliche Name, zum festen Repertoire deutscher Küche. Bundesbürger verzehren im Durchschnitt jährlich rund siebzig Kilogramm. Die Deutsche Gesellschaft für Ernährung empfiehlt den Erdapfel als Teil der Nahrungsbasis, denn die stärkehaltigen Knollen machen nicht nur satt und sind auf vielfältige Art zuzubereiten. Sie liefern auch wichtige Mineralien und Spurenelemente, vor allem Kalium, aber auch Kalzium, Magnesium, Phosphor, Eisen und Zink. Außerdem birgt die Knolle verschiedene B-Vitamine wie Thiamin (B_1), Riboflavin (B_2), Pantothensäure (B_3), Niacin (B_5) und Pyridoxin (B_6), ohne die fast kein biochemischer Prozess im Körper ablaufen kann. Zwar liegt sie mit einem Vitamin-C-Gehalt von rund 17 Milligramm (mg) pro 100 Gramm deutlich hinter Kiwi (100 mg) oder Zitrone (53 mg), kann aber mit Apfel (12 mg) und Birne (5 mg) locker mithalten.

Die rötliche bis blauschwarze Färbung einiger Erdäpfel rührt überdies von Anthocyanen her, Pflanzenfarbstoffen aus der Gruppe der Flavonoide, die sehr effektiv freie Radikale eliminieren. Einige Anthocyane verbessern zudem das Sehvermögen, hemmen Entzündungen, verlangsamen die Blutgerinnung oder schützen Gefäße, etwa indem sie die Durchlässigkeit der Venenwand verringern oder für Entspannung der Arterien und Herzkranzgefäße sorgen und dadurch den Blutdruck senken.

Die Kartoffel, die auf unserem Teller landet, ist weder Frucht noch Wurzel, sondern das verdickte Ende eines unterirdischen Sprosses. Botaniker sprechen von einer Sprossknolle. Diese dient der Pflanze zur vegetativen – also ungeschlechtlichen – Vermehrung. Sobald kein Frost mehr droht, steckt der Bauer sie in die Erde. Auf dem Acker treibt die Kartoffel aus kleinen Vertiefungen aus, den so genannten Augen. Diese bilden neue ober- und unterirdische Sprosse und bis zur Ernte – bei uns je nach Sorte im Mai bis Oktober – auch neue Knollen.

Weil sie nur unterhalb der Oberfläche gedeihen, wird der Boden um die Pflanze meist angehäufelt. Auch gilt es, das Erdreich regelmäßig zu hacken und so zu durchlüften. Um die Übertragung von Kartoffelkrankheiten zu vermeiden, empfiehlt sich ein Abstand von rund 62,6 bis 75 Zentimetern zwischen und 30 bis 40 Zentimetern innerhalb der Reihen. Aus demselben Grund sollten keine Kartoffelreste vom Vorjahr auf dem Feld bleiben und Werkzeuge zum Beschneiden der Pflanzen grundsätzlich desinfiziert werden. Davon, dass viele Bauern inzwischen auf harte Insektizide verzichten, profitiert leider der schon verschwunden geglaubte Kartoffelkäfer.

Übrigens: Sieglinde und Co kommen in weit größerer Varianz daher, als es das Gemüseregal im Supermarkt erahnen lässt: Beim Bundessortenamt – einer Art »TÜV-Prüfstelle« für Nutzpflanzen – sind derzeit 206 Sorten für den Handel von Saatgut und Pflanzenteilen zugelassen und nach Kriterien wie Erregerresistenz, Reifezeit, Ertrag, Blütenfarbe, Knollenform und Kochtyp gelistet.

Vielfalt sorgt aber nicht nur für ein abwechslungsreiches Geschmackserlebnis. Sie spielt auch eine große Rolle für das Sicherstellen der Ernteerträge. Werden nur wenige Sorten angebaut, so steigt das Risiko für Epidemien wie Mitte des 19. Jahrhunderts: Ein Pilzkrankheit, die Krautfäule, vernichtete einen Großteil der Ernte, denn auch damals hatten sich die Landwirte auf wenige Sorten festgelegt. Je größer die Anbauvielfalt und damit der Genpool, desto eher werden sich manche Sorten als resistent erweisen.

Deshalb lagern in der Kartoffelgenbank in Groß Lüsewitz bei Rostock, einer Außenstelle des Instituts für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung Gatersleben, 2834 Kultursorten und Zuchtstämme. Dazu kommen 150 wilde und kultivierte Arten aus Südamerika, von denen die Genbank mehr als 3000 verschiedene genetische Varianzen – fachlich Genotypen – registriert. ◁

Die promovierte Biologin **Stefanie Reinberger** ist freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg. Die Redaktion dankt dem Grafiker Thomas Braun, der auf Äckern selbst recherchierte, sowie den Landwirten, die ihn so freundlich unterstützten.

Hinweis!

Am 18.11.2005 erscheint mit dem Dossier **»Wissenschaft im Alltag«** eine Sammlung von Beiträgen aus der gleichnamigen Spektrum-Rubrik. Eine Bestellmöglichkeit finden Sie schon jetzt auf dem Beihefter oder unter www.spektrum.de/wia.

◀ Welche wird es schaffen? Diese neuen Kartoffelsorten werden auf Testflächen angebaut. Lilafarbene schmecken speckig, rosafarbene würzig, die gelben sind cremig.

WUSSTEN SIE SCHON?

▶ **Spanische Truppen brachten die Kartoffel** im 16. Jahrhundert aus den Anden mit in ihre Heimat. Während dieses Gemüse – wie die Tomate – zu den Nachtschattengewächsen zählt, gehört die Süßkartoffel (Batate) zu den Winden, Topinambur ist ein Korbblüter aus der Gattung der Sonnenblumen.

▶ **Die Salatkartoffel Linda steht vor dem Aus.** Kurz vor Ablauf des dreißigjährigen Sortenschutzes – eine Art Patent auf Saatgut – hat Vermarkter Europlant die Zulassung zurückgezogen. Das Bundessortenamt in Hannover beschloss eine Gnadenfrist bis 30. Juni 2007, doch das Unternehmen hat dagegen Einspruch erhoben. Nun will der niedersächsische Biobauer Karsten Ellenberg die Neuzulassung beantragen. Dann würde Linda aber wie eine Neuzüchtung behandelt und zwei Jahre lang erneut auf ihre Tauglichkeit getestet.

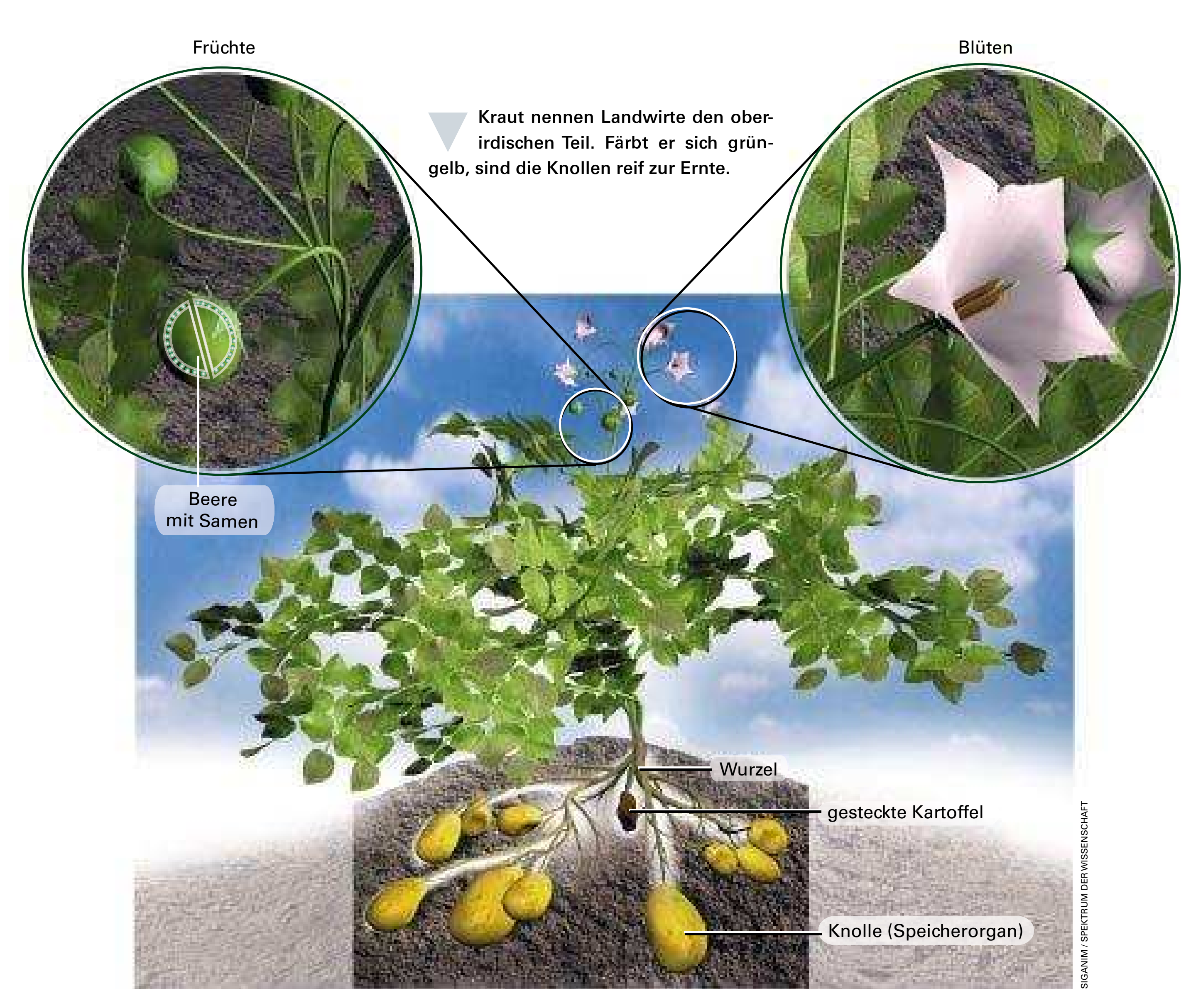
▶ **Hundert Gramm Pellkartoffeln haben nur 57,1 Kilokalorien.** Die gleiche Menge an Pommes Frites schlägt mit 124 Kilokalorien zu Buche, bei Chips sind es sogar 535. Denn Frittieren bildet kleine Poren, durch die Wasserdampf austritt. Nimmt man die »Fritten« aus dem heißen Fett, kühlen die Kanälchen ab und es entsteht Unterdruck, der Fett einsaugt.

▶ **Wer sich im Anbau außergewöhnlicher Kartoffeln** versuchen möchte und keine kommerziellen Absichten hegt, kann bei der Kartoffelgenbank in Groß Lüsewitz kostenlose Proben bestellen (http://glks.ipk-gatersleben.de).

Die Beere enthält rund 100 Samen, aber auch wie bei anderen Nachtschattengewächsen giftiges Solanin.

Die Farbe junger Blütenkelche schwankt je nach Kartoffelsorte zwischen Weiß und Rosa.

Kraut nennen Landwirte den oberirdischen Teil. Färbt er sich grüngelb, sind die Knollen reif zur Ernte.



Langzeitschutz durch Muttermilch

Neugeborene bekommen von ihrer Mutter Antikörper übertragen, die sie in der ersten Lebensphase vor etlichen Infektionen schützen. Doch einiges deutet darauf hin, dass dieses kurzlebige Geschenk noch mehr bewirkt.

Von Hilmar Lemke und Hans Lange

Wir werden in eine gefährliche Welt hineingeboren, voller Mikroben, Schmutz und Staub. Unser Schutz: eine Armada weißer Blutkörperchen mit einem raffinierten Waffenarsenal, abgestimmt auf den jeweiligen Einsatzzweck. Diese Zellen bewachen unseren Körper, immer bereit, das zu bekämpfen, was nicht hineingehört. Woher weiß das Immunsystem aber, wer Freund und wer Feind ist – zumal wenn es noch keine eigenen Erfahrungen sammeln konnte?

Ganz plakativ und stark vereinfacht lautet die Antwort: Seine erste Verteidigungslinie operiert mit einem angeborenen, relativ groben Feindschema, reagiert sofort auf eher pauschale molekulare Merkmale von Mikroben. Anders die zweite Verteidigungslinie: Ihre Trupps aus lauter Spezialisten sind lern- und anpassungsfähig, brauchen aber erst einmal Zeit, um sich gewissermaßen auf das Ziel einzuschießen. Dafür bekämpfen sie dann ganz selektiv – unter anderem mit Antikörpern – den einmal erkannten Erreger und können im Allgemeinen bei erneutem Kontakt rascher und schlagkräftiger gegen ihn vorgehen. Fachleute sprechen von einer erworbenen oder adaptiven Immunität.

Es liegt in der Natur der Sache, dass diese Art perfektionierter Schutz nur in der persönlichen Auseinandersetzung mit Erregern und ihren Produkten erworben werden kann. Allenfalls für die Übergangszeit, so die anerkannte Erklärung, gibt es mütterliche Schützenhilfe. Junge Säugetiere, ob Mensch oder Maus, aber auch Vögel bekommen nämlich vorgefertigte scharfe Munition gespendet: »erprobte« Antikörper aus dem reichen mütterlichen Erfahrungsschatz. Diese sollen ihnen vorübergehend einen gewissen passiven Schutz verleihen – so lange, bis ihr eigenes Immunsystem voll entwickelt und einsatzbereit ist.

Keine Starthilfe vom Vater

Übertragen werden die Abwehrmoleküle beim Menschen schon über die Plazenta und dann über die Muttermilch, bei Mäusen aber hauptsächlich und bei Kühen allein nach der Geburt durch das Säugen. Doch scheint diese allgemein anerkannte Erklärung noch nicht die ganze Wahrheit zu sein: Denn wir und einige andere Forscher sind inzwischen sicher, dass die eigene anpassungsfähige Immunabwehr eines Säugetiers durch die mütterlichen Antikörper nachhaltig geprägt wird. Und das könnte auch medizinisch relevant sein, etwa im Zusammenhang mit Autoimmunkrankheiten und einer Allergieneigung (siehe Kasten S. 70).

Dass ein Muttertier Schutzstoffe auf seine Nachkommen überträgt, erkannte bereits Paul Ehrlich in dem wohl elegantesten immunologischen Versuch des 19. Jahrhunderts. Dieser Pionier der Immunologie und Chemotherapie verpaarte Mäuse, nachdem er wahlweise das Männchen oder das Weibchen gegen bestimmte pflanzliche Protein-Toxine immun gemacht hatte. Dazu hatte er ihnen, wie er 1892 beschrieb, langsam steigende Dosen etwa von Ricin injiziert. Als er einige der Jungen sofort einer hohen, toxischen Dosis aussetzte, erwiesen sich solche von immunen Müttern ebenfalls als gefeit. Die Väter hingegen konnten keinen solchen Schutz übertragen. Wartete Ehrlich aber mit dem Test immer länger, verlor sich der so genannte Nestschutz. Die hilfreichen »Antitoxine« verschwanden bei den jungen Mäusen nach rund sechs Wochen aus dem Blut.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Ehrlichs bis heute anerkannte Schlussfolgerung lautete, dass die Mutter einen passiven Erstschutz vermittelt, der mit dem Verschwinden der Antikörper aufhört. So weiß man etwa, dass Kinder in den ersten Lebensmonaten seltener und weniger schwer an Atemwegsinfektionen mit dem respiratorischen Syncytialvirus RSV leiden, wenn sie von ihrer Mutter hohe Dosen passender Antikörper mitbekommen haben. Auch ist bekannt, dass Frühgeborene, die noch wenige mütterliche Abwehrstoffe im Blut haben und deren Immunsystem zudem unreif ist, ein erhöhtes Risiko für bakterielle Infektionen tragen. Und Tiermediziner nutzen den Effekt sogar gezielt aus, indem sie Muttertiere gegen bestimmte Erreger impfen, um den jungen Nachwuchs zu schützen (siehe Kasten S. 68).

Doch ist dies wirklich alles? Eine ganze Reihe immunologischer Experimente deutet darauf hin, dass die mütterlichen Antikörper weit mehr können, als in der ersten Lebensphase einen passiven Schutz zu vermitteln.

Ab den 1970er Jahren tauchten erste Hinweise im Tierexperiment darauf auf, dass eine Impfung von Muttertieren auch die spätere eigene Reaktion der Jungen auf den jeweiligen Erreger verbesserte. Allerdings könnten – so ein Einwand – verbliebene Spuren des Erregers oder seiner Komponenten aus dem Impfstoff unbeabsichtigt in den Nachwuchs gelangt sein und ihn vorimmunisiert haben.

IN KÜRZE

- **Bei Säugetieren** gehen mütterliche Antikörper spätestens mit der Milch an den Nachwuchs über. Sie schützen ihn vorübergehend vor den Infektionen, gegen die der mütterliche Organismus Immunität erworben hat.
- **Die »geliehene« Immunität** sollte nach herkömmlicher Vorstellung keinen Einfluss darauf haben, wie gut das Abwehrsystem des Nachwuchses später funktioniert, wenn die gespendeten mütterlichen Antikörper längst abgebaut sind.
- **Eine Reihe von Experimenten an Mäusen** belegt aber nachhaltigere Effekte, insbesondere was die Allergieneigung anbelangt.

Muttermilch ist mehr als nur Nahrung. Sie versorgt den Säugling in der ersten Zeit seines Lebens auch mit schützenden Abwehrstoffen. Zudem wirkt sich diese Leihimmunität im Tierexperiment auf das spätere Funktionieren des Immunsystems aus.

Mit immer ausgefeilteren Techniken, darunter so genannten monoklonalen Antikörpern, ließ sich dieser Einwand in der Folge entkräften. Ein elegantes Experiment fand Ende der 1980er Jahre an der Universität des Bundesstaats New York in Buffalo statt. Ein Team um Pearay Ogra injizierte frisch gebackenen Mäusemüttern einen solchen vorgefertigten reinen Antikörper gegen ein Oberflächenprotein des RS-Virus. Ähnlich wie beim Menschen erwarben auch Mäusejunge über die Milch mit diesen »mütterlichen« Antikörpern eine gewisse Leihimmunität gegen RSV. Doch das eigentlich Interessante kam erst: Injizierte das Forscherteam solchen Nachkommen im Erwachsenenalter erstmals die gleichen Erregerbestandteile als Erstimpfung, so fiel die Immunantwort gleich ▷

Nützliche Leihimmunität

In der Tiermedizin werden Muttertiere gegen bestimmte Erreger immunisiert, damit der Nachwuchs in der ersten Zeit gegen solche Infektionen gefeit ist. Das gelingt auch bei Vögeln, die mit dem Eidotter einen Vorrat an Antikörpern liefern.

Tierart	Erreger	verursacht
Rind	Coronavirus	Durchfall
Rind	Rotavirus	Durchfall
Pferd	Herpesvirus	Fehlgeburt
Huhn	Birnavirus	Bursa-Krankheit (Tiere wachsen nicht mehr und sterben)
Huhn	Enterovirus	Hirn-Rückenmark-Entzündung
Ente	Hepatitisvirus	Leberentzündung

sehr stark aus – wie sonst erst nach dem zweiten Kontakt.

Fast sah es aus, als ob sich das Immunsystem der Mäuse an den Feind erinnerte – obwohl es ihn persönlich noch nie zu Gesicht bekommen hatte. Auch die Mütter waren nicht damit in Kontakt gekommen.

Auf Nummer sicher

Diese und ähnliche Ergebnisse von verschiedenen Forschern weckten unsere Neugier. Für unsere Untersuchungen wählten wir einen experimentellen Ansatz, der auf so genannten Halbantigenen oder Haptenen basiert. Anders als echte Antigene, körperfremde Proteine etwa, lösen solche niedermolekularen Fremdstoffe allein keine adaptive Immunantwort aus. Koppelt man sie aber an ein geeignetes Trägermolekül, erzeugt der Organismus gegen sie Antikörper. Mit Hapten-Carrier-Systemen wurde insbesondere das komplexe Wechselspiel zwischen den beiden wichtigsten Spezialeinheiten der adaptiven Immunabwehr aufgeklärt: den B- und den T-Zellen. Erstere sind Erzeuger von Antikörpern, Letztere hingegen haben unter anderem entscheidende Helfer- und Regulatorfunktionen.

Die Reaktion des Immunsystems auf verschiedene Haptene ist somit sehr gut untersucht. Als Versuchstiere dienen meist ingezüchtete Mäusestämme, deren Mitglieder als genetisch identisch zu betrachten sind. Man weiß daher für bestimmte Stämme genau, welche Arten von Antikörpern beim ersten beziehungsweise bei weiteren Kontakten mit dem gewählten Hapten entstehen. Wir konnten also sicher sein, dass wir nicht – wie es bei Experimenten mit Erregerkomponenten denkbar wäre – irgendwelche Nebeneffekte beobachteten.

Zunächst stellten wir monoklonale Antikörper gegen das Hapten her, die wir dann künftigen Mäusemüttern injizierten (siehe Kasten rechts). Wie erwartet fanden sich die gleichen Antikörper auch im Blut des gesäugten Nachwuchses wieder. Wir warteten ab, bis diese Moleküle länger nicht mehr nachweisbar waren, und immunisierten dann die mittlerweile erwachsenen Tiere mit dem Hapten-Träger-Komplex. Und tatsächlich: Ihr Abwehrsystem reagierte deutlich stärker als sonst bei Erstkontakt – mit mehr Antikörpern, von denen einige zudem eine viel höhere Affinität zu dem Hapten aufwiesen als die besten entsprechenden Moleküle von Vergleichstieren.

Fast sah es aus, als ob sich das Immunsystem der Mäuse an den Feind erinnerte – obwohl es ihn persönlich noch nie zu Gesicht bekommen hatte

Die Qualität hatte bis dahin noch nie jemand geprüft. Es sah aus, als hätten die dem Muttertier injizierten Antikörper irgendwie sogar das Feintuning der Immunantwort im Nachwuchs gefördert.

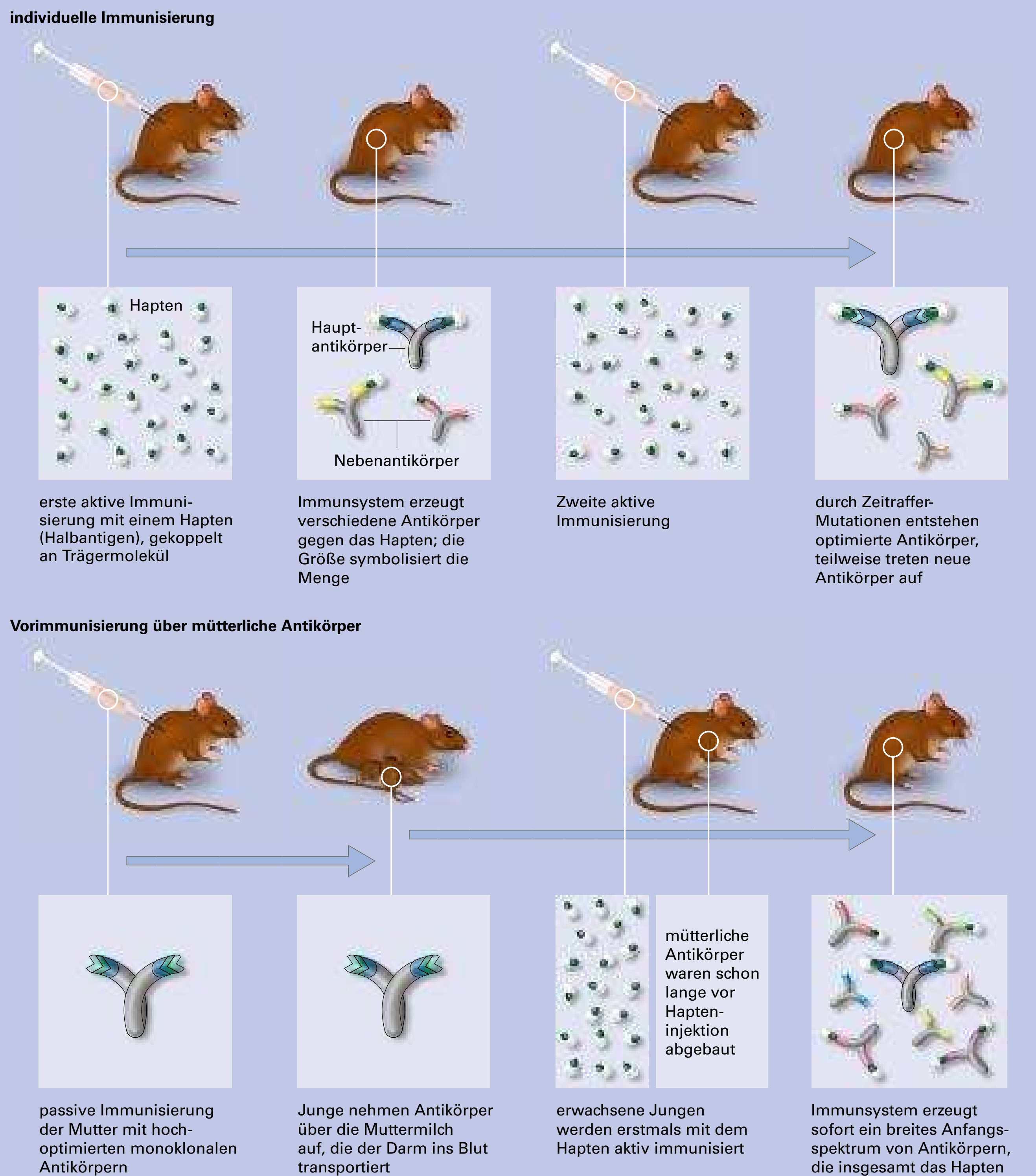
Doch damit nicht genug. Als wir die wieder nächste Generation – also Enkel passiv immunisierter »Großmütter« – untersuchten, entdeckten wir Erstaunliches: Rund die Hälfte von ihnen reagierte auf diesen Erstkontakt mit dem Hapten ebenfalls noch verstärkt – gerade so, als ob sie die Information bereits in ihrem immunologischen Gedächtnis gespeichert hätten. Wohlgemerkt – dieser Nachwuchs stammte von Töchtern, die selbst keinen Provokationstest erlebt, sondern nur geringe Mengen entsprechender Antiköper mit der Muttermilch eingesogen hatten.

Diese Beobachtung und anderes verstärkte in uns die Zweifel an der verbreiteten Lehrmeinung, aufgenommene mütterliche Antikörper blieben ohne Konsequenzen für das weitere Funktionieren des Immunsystems. Hatte es etwa von dem der Mutter gelernt? Und wie? Sollte es im Fall des Immunsystems vielleicht sogar eine Art »Vererbung« von Erlerntem geben, ähnlich wie der französische Naturforscher Jean-Baptiste Lamarck (1744–1829) einst gemeint hatte, erworbene Eigenschaften könnten dauerhaft an die Nachkommen weitergegeben werden?

Um das bemerkenswerte Phänomen zu erklären, müssen wir zunächst die Antiköper unter die Lupe nehmen. Diese Moleküle, mit denen B-Zellen ihr Antigen erkennen und im Blut abfangen können, sind auch als Immunglobuline, kurz Ig, bekannt. In ihrer Grundform ähneln sie einem Ypsilon. Für dessen Armbereich hat jede der Zellen bei ihrer Entwicklung eine individuelle Bauanweisung zusammengestellt, und zwar aus dem dafür vorgesehenen genetischen Grundbaukasten. Für den Stamm des Ypsilons hingegen gibt es enge Vorgaben. Nach seinem Aufbau unterscheidet man fünf Klassen von Immunglobulinen: IgM, IgD, IgG, IgE und IgA, auf-

Nachhaltiger Effekt mütterlicher Antikörper

Eine zweite oder dritte Immunisierung mit einer Substanz verbessert die Abwehr. Das ist das Prinzip der Schutzimpfung (obere Hälfte). Wenn neugeborene Mäuse mit der Milch monoklonale, optimierte Antikörper aufnehmen, die das Muttertier injiziert bekam, reagiert ihr Immunsystem später gegen die erstmals abzuwehrende Substanz sogleich stärker – als wäre es der Zweitkontakt. Anders als sonst bei einer Erstimmunisierung ist das Spektrum an Antikörpern breiter und ihre Bindungsqualität besser (unten). Der Effekt der Antikörperinjektion kann sich teilweise sogar bis in die Enkelgeneration erstrecken.



ART FOR SCIENCE

gelistet in der Reihenfolge ihrer Gene. Den einzelnen Klassen kommen dabei verschiedene Aufgaben zu. IgM etwa ist die Erstausstattung für die abgegebene, aber auch für die »bodenständige« Form des Antikörpers, die als erster Antigen-Rezeptor auf einer B-Zelle sitzt.

Was Paul Ehrlich noch nicht wissen konnte: Nur bestimmte Klassen von Abwehrstoffen gehen von der Mutter auf das Kind über – nämlich IgA und IgG mit der Milch, wobei allein die letzte Sorte vom Magen-Darm-Trakt aus in den gesamten Körper verteilt und auch schon über die Plazenta dorthin transportiert werden kann. Diese Kategorien zeugen davon, dass ihre jeweilige Herstellerzelle gewissermaßen diensterprobt ist. Sie hat sich nach dem Erstkontakt vermehrt, einen Klassenwechsel im Ig-Programm durchgeführt und sich auf Dauerproduktion eingestellt.

Spuren im Gedächtnis

B-Zellen sind allerdings gewöhnlich nicht von sich aus zum Umschwenken auf die G-Klasse fähig. Sie benötigen dazu die Unterstützung von T-Helferzellen. Fachlich spricht man daher von einer thymusabhängigen Immunantwort – benannt nach dem Organ, in dem die T-Zellen heranreifen. Zu beobachten ist sie vor allem, wenn die erkannte molekulare Struktur einem Protein angehört.

Im Lauf dieser Immunantwort wandeln sich einige der B-Zellen, die sich rasch vermehren, in regelrechte Antikörperfabriken um. Außerdem entstehen Gedächtniszellen: spezialisierte T- und B-Zellen, welche die Bewährungsprobe gut bestanden haben und als Reserve Jahre, teils sogar lebenslang (wenn sie gegen die Erreger von Kinderkrankheiten gerichtet sind) im Körper überdauern können. Kommen sie erneut in Kontakt mit dem altbekannten Feind, teilen sie sich sehr schnell. Solche B-Zellen kurbeln diesmal sofort die Produktion von Molekülen der G-Klasse an. So wird der Eindringling bei seinem zweiten Angriff viel schneller und effektiver bekämpft –

Wohl und Wehe immunologischer Prägung

Ein positiver Effekt mütterlicher Antikörper der Klasse G zeigt sich nicht nur im Zusammenhang mit Impfungen, sondern auch mit Allergien. Wesentlicher Auslöser allergischer Hautreaktionen und allergischen Asthmas sind übermäßige Immunreaktionen, bei denen vermehrt Antikörper der Klasse E entstehen.

Wir haben trächtigen Mäusen eines Stamms, der genetisch bedingt zu Überempfindlichkeiten neigt, einen eigens hergestellten G-Antikörper gegen die Hauptkomponente des Bienengifts injiziert. Sie ist oft schuld, wenn Menschen auf Bienenstiche allergisch reagieren. Als in den Nachkommen kein mütterlicher Antikörper mehr nachweisbar war, versuchten wir, sie mit dem Giftbestandteil zu »allergisieren«. Fand der erste Kontakt damit bis zum vierten Lebensmonat statt, war ihre Produktion von Antikörpern der Klasse E gegen das Gift unterdrückt – und sie blieb es über ein Jahr lang, sofern die Tiere auch weiterhin in monatlichen Abständen mit dem Allergen konfrontiert wurden.

Das Ganze funktionierte genauso mit G-Antikörpern gegen ein inhalierbares Allergen, das bei Mäusen Asthma bewirkt. Ohne zwischenzeitlichen Kontakt verebbt jedoch die Wirkung nach einem halben Jahr. Der Langzeiteffekt der mütterlichen Antikörper kommt also speziell zum Tragen, wenn die besondere Form des Immungedächtnisses auch benutzt wird, die von ihnen hervorgerufen wurde.

Diese Befunde passen gut zu der gegenwärtigen Vorstellung, dass auch beim Menschen die frühe Lebenshase über die spätere Entwicklung von Allergien mitentscheidet. So scheint Stillen gegen Neurodermitis vorzubeugen. Und wer beispielsweise im ersten Lebensjahr und möglichst noch bis zur Einschulung auf einem Bauernhof aufwächst, kommt mit Keimen in Berührung und leidet später durchschnittlich seltener an Allergien oder Asthma.

Nicht nur den Tierversuchen nach scheinen somit bei solchen Effekten zwei Dinge wichtig zu sein und zusammenzuwirken:

- Die Mütter sollten qualitativ hochwertige Antikörper gegen möglichst viele Umweltantigene entwickelt haben und an das Kind weitergeben.
- Das Immunsystem sollte rechtzeitig gefordert werden.

Interessanterweise erhöht ein Zuviel an Hygiene auch das Risiko, an verschiedenen Formen von Leukämie zu erkranken. Dieses ist am geringsten, wenn die Babys lange gestillt werden und schon in den ersten Lebensmonaten allgemeine Infektionen durchmachen, die durch soziale Kontakte – entweder mit älteren Geschwistern oder in Spielgruppen – übertragen werden.

Mütterliche Antikörper können allerdings auch potenziell schädliche Varianten enthalten – solche, die unter Umständen eine zerstörerische Reaktion so genannter T-Zellen gegen körpereigene Strukturen einleiten. Dies bedeutet im schlimmsten Fall, sofern weitere Faktoren hinzukommen, dass beim Nachwuchs eine Autoimmunerkrankung auftritt. Die Mütter selbst müssen keine Symptome zeigen.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Bienenstiche sind für sensibilisierte Allergiker lebensbedrohlich. Bei Mäusen konnte eine Vorbehandlung der Mutter und eine Nachbehandlung des Nachwuchses das Ausbilden einer Bienengiftallergie verhindern.

zumal sich auch die Passgenauigkeit der Antikörper bei jedem Großeinsatz verbessert. Während der Vermehrung wird nämlich durch Mutationen, gepaart mit einer Art Darwin'schen Auslese, der Armbereich eines Antikörpers im Zeitraffertempo für das Antigen optimiert: Seine Affinität steigt. Verzehnfacht diese sich beispielsweise bei jeder Auseinandersetzung, bindet die dritte Folgegeneration Antikörper dann schon tausendfach begieriger ihr Zielobjekt.

Diese Vorstellung vom Zusammenspiel verschiedener Komponenten des Immunsystems wurde nie widerlegt, ist aber irgendwie aus der Mode geraten

Kein Wunder also, dass bewährte mütterliche Antikörper dem Nachwuchs einen wirkungsvollen Anfangsschutz vermitteln. Doch selbst ihre hohe Qualität erklärt nicht, weshalb auch noch die erwachsenen Tiere und teilweise sogar deren Nachkommen immunologisch davon zu profitieren scheinen. Denn dazu müssten die übertragenen Antikörper Spuren im immunologischen Gedächtnis hinterlassen.

Des Rätsels Lösung liegt – davon sind wir überzeugt – in einer Hypothese, die der dänische Immunologe Niels Jerne bereits 1974 formulierte und für die er 1984 den Nobelpreis erhielt: die Netzwerktheorie. Diese Vorstellung vom Zusammenspiel verschiedener Komponenten des Immunsystems wurde nie widerlegt, ist aber irgendwie aus der Mode geraten und daher in neueren immunologischen Lehrbüchern kaum noch zu finden. In der Fachliteratur ist sie jedoch weiterhin als Grundlage vieler Untersuchungen präsent.

Jerne stützte sich auf frühere Erkenntnisse anderer Forscher, wonach das Immunsystem auch verschiedene Antikörper gegen den individuellen Teil, den so genannten Idiotyp, anderer Antikörper ausbilden kann. An dem Y-förmigen Molekül sind das die Arme mit ihren Greifhänden, denn deren genetische Bauanweisung wird von jeder jungen B-Zelle variabel zusammengestellt und nachträglich noch optimiert. »Anti-Antikörper« gegen die variablen Strukturen bezeichnet man fachsprachlich als anti-idiotypische Antikörper. Deren Gegenwart sollte dann theoretisch wiederum die von Anti-Anti-Antikörpern anregen und so fort.

Angenommen, das fremde Antigen ist ein virales Protein. Die Greiffläche eines primären Antikörpers soll auf einen der äußeren Bereiche des Erregermoleküls passen, als wäre sie die Negativform dazu. Dann müsste ein komplementärer Antikörper, der seinerseits zu diesem Negativ passt, in der Form seiner eigenen Greifhand wieder dem Positivrelief ähneln. Die wäre somit eine Art Imitat dieser Stelle des Antigens.

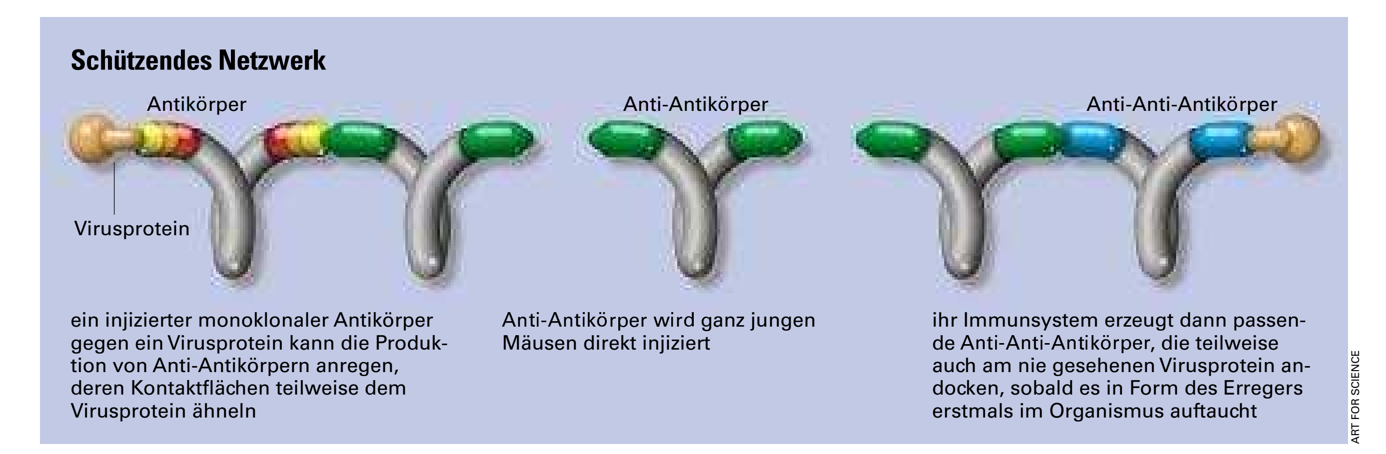
Jerne erkannte als Erster die biologische Tragweite des Phänomens. Da B-Zellen ihren jeweiligen Antikörper auch als Sensor auf der Oberfläche tragen, sollte es Wechselwirkungen zwischen den sozusagen positiven und negativen Akteuren geben. Außerdem bedurfte die Produktion anti-idiotypischer Antikörper einer Starthilfe durch T-Zellen, weil das Zielobjekt ein Immunglobulin und somit ein Protein ist. Das Immunsystem sei – so Jerne – nur als ein solches funktionelles Netzwerk von B- und T-Lymphocyten und Antikörpern zu verstehen. Ob ein Antikörper irgendeiner Stufe dabei anregend oder hemmend auf die gesamte Immunantwort wirke, hänge von seiner Konzentration und vom Zusammenspiel mit den übrigen Komponenten ab.

Feindbild inklusive

Inzwischen gibt es viele Versuchsergebnisse, welche die propagierten Wechselwirkungen belegen. So kann etwa ein Anti-Antikörper zumindest funktionell auch als Abbild des ursprünglichen Antigens dienen. Zahlreiche Forscher lieferten dafür Belege. Ogras Team beispielsweise vermochte junge Mäuse später leichter gegen das RS-Virus immun zu machen, wenn es ihnen als Vorimpfung direkt nach der Geburt Anti-Antikörper injiziert hatte – und zwar solche, die sich spezifisch gegen den ersten monoklonalen RSV-Antikörper richteten, der diesmal dem Muttertier aber nicht verabreicht wurde (siehe Grafik S. 72).

Auf den ersten Blick mag irritieren, dass es hier offenbar keine Rolle spiel- ▷

Schützendes Netzwerk



ein injizierter monoklonaler Antikörper gegen ein Virusprotein kann die Produktion von Anti-Antikörpern anregen, deren Kontaktflächen teilweise dem Virusprotein ähneln

Anti-Antikörper wird ganz jungen Mäusen direkt injiziert

ihr Immunsystem erzeugt dann passende Anti-Anti-Antikörper, die teilweise auch am nie gesehenen Virusprotein andocken, sobald es in Form des Erregers erstmals im Organismus auftaucht

te, ob der längst entwöhnte Nachwuchs einst einen Antikörper über die Muttermilch eingesaugt oder ob er direkt komplementäre Antikörper als RSV-Imitat erhalten hatte. Wie die Forscher aber feststellten, besaßen entwöhnte Tiere, die einst den primären, vergänglichen Antikörper aufgenommen hatten, in ihrer Milz später Immunzellen, die zumindest in der Zellkultur ein Gegenstück dazu selbst erzeugen konnten. Ihr Körper verfügte somit wohl ebenfalls über ein »Feindbildimitat«.

Schmales Zeitfenster

Mit der Vorstellung eines immunologischen Netzwerks sind solche Ergebnisse gut zu vereinbaren. Als wir Ende der 1990er Jahre die Hapten-Reaktion von Mäusen untersuchten, legten jedenfalls mehrere bis dahin bekannte Studien bereits nahe, dass ein mütterlicher Antikörper – wie auch immer – langfristig das sich entwickelnde B-Zell-Repertoire des Nachwuchses beeinflusst. Hatte er das auch bei unseren Mäusen getan? Warum waren ihre eigenen Antikörper nach der Erstimpfung sogleich besser? Hatten ihre B-Zellen, wie sonst bei Zweitkontakt mit Erregern üblich, ein Feintuning durch Mutation durchlaufen?

Wir nahmen die Antikörper, die in den erwachsenen Töchtern und Söhnen nach der Erstimpfung mit unserem Hapten entstanden waren, genauer unter die Lupe. Dazu muss man wissen, dass ein Antigen und damit auch ein Impfstoff beim ersten Mal einen Cocktail von Abwehrmolekülen induziert. Im Fall eines Haptens dominiert in der Mixtur ein bestimmter Antikörper. Sein Anteil ist bei unserem Hapten innerhalb eines ingezüchteten Mäusestamms ziemlich konstant, zwischen Stämmen mit anderem genetischen Makeup aber verschieden. Im Lauf der primären Immunreaktion verbessert sich die Affinität, überwiegend durch Mutation und Auslese beim Hauptantikörper. Nach der zweiten oder dritten Impfung tauchen neue Nebenantikörper auf, deren variable Bereiche auf anderen Komponenten des genetischen Baukastens als bei ihren Vorgängern basieren. Und diese neuen Nebenantikörper können nun in unterschiedlichem Maße ebenfalls zu Mutationen neigen.

Was war bei unseren erstgeimpften Tieren durch den früheren Nestschutz nun anders? Die Mixtur ihrer Antikörper variierte sehr stark, insbesondere der Anteil des bekannten Hauptantikörpers. Es gab gewöhnlich mehr verschiedene Nebenantikörper als sonst, aber keine mutierten Abkömmlinge des Haupt- und der üblichen Nebenantikörper. Damit war klar: Das Immunsystem unserer Tiere hatte ein neues und breiteres Anfangsspektrum von Abwehrstoffen produziert.

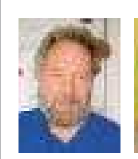
Die mit der Muttermilch aufgesogenen Antikörper mussten das unreife Abwehrsystem der neugeborenen Mäuse in einer Art und Weise moduliert haben, dass sich die Basis für den späteren ersten echten Kontakt mit dem Fremdstoff änderte. Sie hatten eine Art immunologisches Gedächtnis begründet, das sich bei Bedarf reaktivieren ließ. Ob es sich dabei aber um dieselbe Form handelt, die in den Lehrbüchern beschrieben wird, wie es funktioniert und welche Zelltypen daran beteiligt sind, ist noch nicht geklärt.

Auch wissen wir noch nicht, warum diese immunologische Prägung durch übertragene Antikörper und die Aktivierung des Netzwerks nur bei ganz jungen Tieren funktioniert. Alle bisherigen Versuche von uns und anderen Forschern haben gezeigt, dass die mütterlichen Antikörper nur in einem schmalen Zeitfenster nach der Geburt – bei Mäusen etwa drei Wochen – überhaupt in der Lage sind, die spätere Immunabwehr zu beeinflussen.

Nicht nur Erregerkomponenten können dem Organismus ein »Feindbild« vermitteln. Auch mit Antikörpern gegen die Bindungsstelle eines Antikörpers, der seinerseits die Komponente bindet, gelingt teilweise eine erste Immunisierung.

Indem bewährte mütterliche Antikörper das unreife Abwehrsystem prägen und sein späteres Verhalten im akuten Fall beeinflussen, erbt der tierische Nachwuchs gewissermaßen einen Teil der immunologischen Erfahrung seiner Mutter. Ob diese Erkenntnis jemals dazu genutzt werden kann, gezielt eine Immunisierung von Schwangeren zum nachhaltigen Wohl ihrer Nachkommen anzustreben, bleibt abzuwarten. Noch fehlt genaues Wissen, wie die immunologische Prägung beim Menschen funktioniert. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE




Hilmar Lemke (links) ist Professor am Biochemischen Institut der Medizinischen Fakultät der Universität Kiel. **Hans Lange** ist Biologe, seit 1990 Mitglied der Arbeitsgruppe und hat 1997 promoviert.

Lamarckian inheritance by somatically acquired maternal IgG phenotypes. Von H. Lemke et al. in: Trends in Immunology, Bd. 25, Nr. 4, S. 180, 2004

Reversal of the adult IgE high responder phenotype in mice by maternally transferred allergen-specific monoclonal IgG antibodies during a sensitive period in early ontogeny. Von H. Lange et al. in: European Journal of Immunology, Bd.32, Nr. 11, S. 3133, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Fischadlerhorste auf Telegrafenmasten

»Bei einem Besuch der Salzmarschen an der Küste von New Jersey konnte ich folgende Beobachtung machen: … das Nest eines Fischadlers, das auf einem Telegraphenmast gebaut war. Bei der Weiterfahrt erblickte ich noch etwa 20 weitere derartige Nester, zum Teil direkt an einer stark befahrenen Straße. Ich sehe hierin ein wunderbares Beispiel für die Anpassungsfähigkeit der Tierwelt; denn der Fischadler, der an sich als Baumbrüter bekannt ist, hat sein Nest hier auf Telegraphenmasten verlegen müssen, da es weit und breit keinen Baum gibt.« *(Kosmos, 51. Jg., Heft 10, S. 491, Oktober 1955)*



Käfer im großen Windkanal der Technischen Hochschule Stuttgart

Insulin-Pistole

»Die ›Insulin-Pistole‹ ist ein Instrument, das mit der rechten oder linken Hand bedient und dessen Nadel in jeden beliebigen Körperteil eingeführt werden kann … Die hohe Geschwindigkeit der Nadel, mit der sie die Haut ›durchschiesst‹, und die genau kontrollierte Tiefe ihres Eindringens gewährleisten eine wirksame, schmerzlose und gleichbleibende Injektion. Die ›Pistole‹ hilft dem Patienten die inneren Hemmungen überwinden, die eintreten, wenn man sich durch wiederholte Injektionen immer wieder Schmerz zufügen muss. Das neue Instrument schafft gewissermassen eine unpersönliche Beziehung zwischen Patient und Nadel.« *(Neuheiten und Erfindungen, 22. Jg., Nr. 253, S. 187, 1955)*

Käfer im Windkanal

»Das Bestreben, den Luftwiderstand möglichst klein zu halten, gab Anlaß zu Versuchen mit verschiedenen Fahrzeugformen im Windkanal … Die Ergebnisse derartiger Messungen werden vorzugsweise als dimensionslose Beiwerte … dargestellt. … Die Untersuchungen haben ergeben, daß Fahrzeuge mit günstigem Luftwiderstand meist mit abfallendem und windschlüpfigem Heck infolge der guten Umströmung des Heckteiles bei Seitenwind empfindlicher sind als Wagen mit abgesetztem Heck oder kastenartigem Aufbau, die dafür einen ungünstigeren Luftwiderstandsbeiwert aufweisen.« *(Umschau, 55. Jg., Heft 19, S. 583, 1955)*



▲ Auf dem Laufsteg: Atmungsrock (A.R.) zur Rettung unter Tage

Mit Atemrock und Melone

»Ein ›Arbeitsapparat‹ wurde konstruiert, welcher zur Ausrüstung der nach einer Grubenkatastrophe von obertags eindringenden Rettungsmannschaft bestimmt ist … Dieser … besteht aus 3 Regenerationspatronen, die durch ein oberes und ein unteres Querrohr … einerseits mit den beiden Atmungsschläuchen samt Mundstück, andrerseits mit dem Atmungssack verbunden sind … Der Atmungssack, mit 10 l Sauerstoff vorgefüllt, wird am Rücken in einem Korb getragen, oder er besitzt die Gestalt des Rückenteiles eines Rockes … Die Leistungsfähigkeit des Arbeitsapparates gestattet eine einstündige schwere Arbeit und einen halbstündigen Rückzugsmarsch.« *(Die Umschau, 9. Jg., Nr. 42, S. 847, Oktober 1905)*



Geistesfähigkeiten bei Mann und Weib

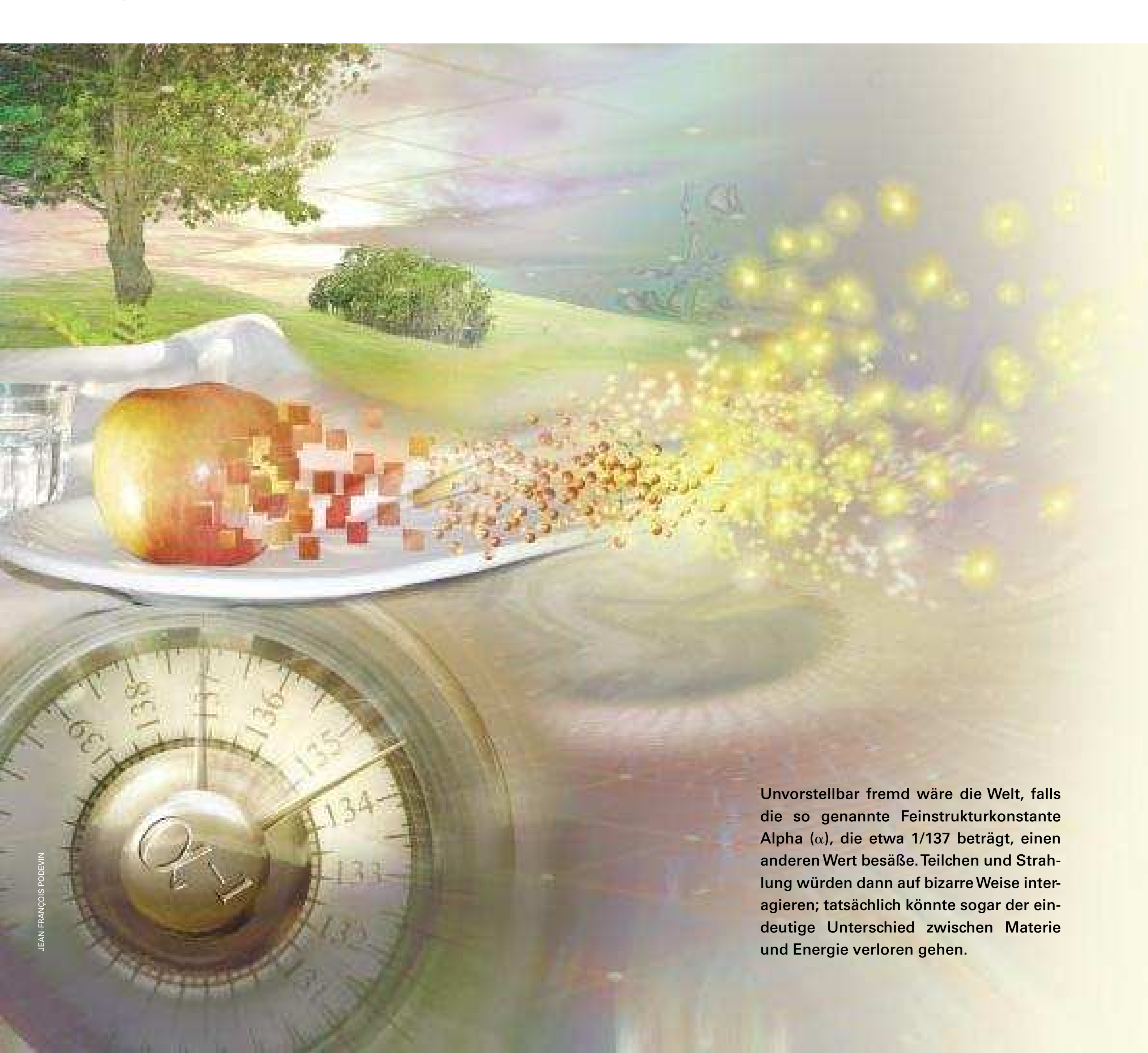
»Thompson führte eine Anzahl von Experimentalversuchen aus … Die Untersuchung der motorischen Fähigkeiten ergab eine bessere Entwicklung derselben bei den Männern als bei den Frauen … Es wurde festgestellt, dass den Frauen ein besseres Gedächtnis zukommt als Männern und dass sie schneller auswendig lernen … Beim Manne ist das Geselligkeitsgefühl besser ausgebildet, dafür das religiöse mehr bei der Frau. Deswegen ist wohl auch die Frau für Vorbedeutung, Ahnungen und Aberglauben weit empfänglicher.« *(Die Umschau, 9. Jg., Nr. 42, S. 837, Oktober 1905)*

Sonnenentfernung durch Dopplereffekt

»Eine eigenartige und besonders interessante Bestimmung der Sonnenentfernung auf spektroskopischem Wege ist in neuester Zeit Professor Küstner gelungen … Hierbei werden Verschiebungen von photographisch aufgenommenen Spektrallinien gewisser heller, nahe der Ekliptik am Himmel gelegener Sterne zu entgegengesetzt liegenden Jahreszeiten gemessen … Auf diese Weise läßt sich die Bewegung der Fixsterne im Gesichtsradius und die Erdgeschwindigkeit bestimmen, mit welcher auch der Beobachter sich bewegt … aus der beobachteten mittleren Erdgeschwindigkeit kann man daher die Sonnenentfernung berechnen.« *(Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 243, S. 134, Oktober 1905)*

Veränderliche Naturkonstanten

Ein Dogma der Physik scheint ins Wanken zu geraten: Ist das, was die Welt in ihrem Innersten zusammenhält, gar nicht konstant, sondern eine Funktion der Zeit?



JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

Unvorstellbar fremd wäre die Welt, falls die so genannte Feinstrukturkonstante Alpha (α), die etwa 1/137 beträgt, einen anderen Wert besäße. Teilchen und Strahlung würden dann auf bizarre Weise interagieren; tatsächlich könnte sogar der eindeutige Unterschied zwischen Materie und Energie verloren gehen.

Von John D. Barrow und John K. Webb

Manche Dinge ändern sich nie. Physiker nennen sie Naturkonstanten. Größen wie die Lichtgeschwindigkeit c, Newtons Gravitationskonstante G und die Ruhemasse des Elektrons m_e haben, so die allgemeine Überzeugung, überall im Universum und zu allen Zeiten denselben Wert. Sie bilden das Gerüst, mit dessen Hilfe die physikalischen Theorien errichtet wurden, und sie bestimmen die grundlegende Struktur unseres Universums. In dem Maße, in dem ihre Werte experimentell immer präziser gemessen wurden, hat sich das gesamte Gebäude der Physik weiterentwickelt.

Und doch: Erstaunlicherweise konnte bislang niemand auch nur eine dieser Konstanten berechnen oder theoretisch begründen. Warum sie ihre speziellen Zahlenwerte besitzen, ist schlicht unbekannt. In ihren jeweiligen SI-Einheiten, dem internationalen Einheitensystem, ist $c = 299\,792\,458$, $G = 6{,}6742 \cdot 10^{-11}$ und $m_e = 9{,}1093826 \cdot 10^{-31}$ (Tabelle rechts). Diese Zahlen folgen keinem erkennbaren Muster. Das einzig Gemeinsame ist: Würden einige von ihnen auch nur geringfügig von ihrem tatsächlichen Wert abweichen, gäbe es keine komplexen atomaren Gebilde – und damit auch keine Lebewesen. Der Wunsch, die Konstanten aus etwas Tiefgründigerem abzuleiten, war eine der treibenden Kräfte hinter den Bemühungen, eine umfassende, einheitliche Beschreibung der Natur zu entwickeln, eine »Theorie von Allem«. Die Physiker hofften damit zeigen zu können, dass jede Naturkonstante nur einen logisch möglichen Wert besitzt.

Das würde eine tiefer liegende Ordnung in der scheinbaren Willkür der Natur enthüllen. Doch in den letzten Jahren ist die Frage nach dem Status der Konstanten keineswegs einfacher geworden. Forscher fanden heraus, dass der beste Kandidat einer umfassenden Theorie – eine Variante der Stringtheorie namens M-Theorie – nur dann in sich konsistent ist, wenn das Universum nicht nur vier Raum-Zeit-Dimensionen besitzt, sondern bis zu sieben weitere Dimensionen. Eine Folgerung davon ist, dass die beobachteten Konstanten womöglich nicht wirklich fundamental sind. Diese gäbe es wohl nur in dem höherdimensionalen Raum, und wir würden dann nur ihre dreidimensionalen »Schatten« sehen.

Fundamente unserer Welt

Inzwischen akzeptieren die Physiker auch, dass die Werte vieler Konstanten möglicherweise durch zufällige Ereignisse und Elementarteilchenprozesse in der Frühzeit des Universums zu Stande kamen. Die Stringtheorie erlaubt nämlich eine riesige Anzahl möglicher Welten – 10^{500} – mit unterschiedlichen, in sich konsistenten Naturgesetzen und -konstanten. Warum ausgerechnet unsere Kombination realisiert wurde, lässt sich bislang nicht erklären. Vielleicht ergeben künftige Forschungen, dass es nur eine logisch mögliche Welt geben kann. Doch vorläufig müssen wir weiterhin die enervierende Möglichkeit in Betracht ziehen, dass unser bekanntes Universum nur eines von vielen ist – ein Teil eines Multiversums. Unterschiedliche Bereiche dieses Multiversums sind unterschiedlichen Lösungen der Theorie unterworfen. Die von uns beobachteten Naturgesetze stellen dann nur eine spezielle Version aus einer immensen Vielfalt möglicher Varianten mit jeweils lokalem Geltungsbereich dar (siehe »Paralleluniversen« von Max Tegmark, Spektrum der Wissenschaft 8/2003, S. 34).

IN KÜRZE

- Fast alle physikalischen Gleichungen enthalten Größen, die wie die Lichtgeschwindigkeit als **Naturkonstanten** gelten. Sie sollen immer und überall denselben Wert aufweisen.
- Diese Annahme stellen die Autoren seit sechs Jahren in Frage. In Spektren von fernen Quasaren fanden sie Hinweise, nach denen die chemischen Elemente in ferner Vergangenheit Licht anders absorbierten als heute. Den Unterschied erklären sie mit einer winzigen **Änderung der Feinstrukturkonstanten Alpha (α).**
- Diese Variation, falls sie bestätigt wird, wäre revolutionär, denn **dann würden die Naturgesetze ihre universelle Gültigkeit verlieren.** Sie wäre auch ein Hinweis auf zusätzliche Dimensionen des Raums.

Wichtige Naturkonstanten

Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
$c = 299\,792\,458$ m s^{-1}

Elementarladung
$e = 1{,}60217653 \cdot 10^{-19}$ C

Planck'sches Wirkungsquantum
$h = 6{,}6260693 \cdot 10^{-34}$ J s

Ruhemasse des Elektrons
$m_e = 9{,}1093826 \cdot 10^{-31}$ kg

Ruhemasse des Protons
$m_p = 1{,}67262171 \cdot 10^{-27}$ kg

Permeabilität des Vakuums
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ N A^{-2}

Dielektrizitätskonstante des Vakuums
$\varepsilon_0 = 8{,}854187817 \cdot 10^{-12}$ F m^{-1}

Gravitationskonstante
$G = 6{,}6742 \cdot 10^{-11}$ m^3 kg^{-1} s^{-2}

Avogadro-Konstante
$N_A = 6{,}0221415 \cdot 10^{23}$ mol^{-1}

Boltzmann-Konstante
$k_B = 1{,}3806505 \cdot 10^{-23}$ J K^{-1}

Feinstrukturkonstante
$\alpha = e^2/2\varepsilon_0 hc = 1/137{,}03599911$

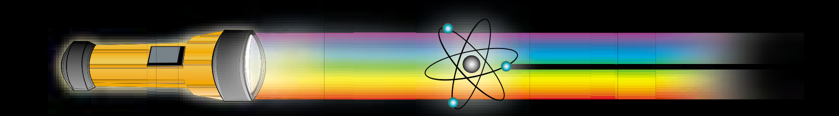
Für die Zahlenwerte vieler unserer Konstanten gäbe es dann keine weitergehende Erklärung als die, dass sie just eine der wenigen Kombinationen darstellen, mit denen die Entwicklung eines Bewusstseins möglich ist. Unser beobachtbares Universum könnte also eine von vielen isolierten Oasen sein, die in der Unendlichkeit eines leblosen Raums eingebettet sind, in dem völlig andere Naturgesetze herrschen. Teilchen wie Elektronen und Gebilde wie Kohlenstoffatome oder gar das Erbmolekül DNA wären darin unmöglich. Wenn Sie versuchen würden, sich in diese surreale Außenwelt vorzuwagen, würden Sie aufhören zu existieren.

So gibt die Stringtheorie mit der einen Hand und nimmt mit der anderen. Ihre Begründer hofften unter anderem, mit ihr die scheinbar willkürlichen Werte der physikalischen Konstanten erklären zu können. Zwar enthalten ihre Grundgleichungen nur wenige freie Parameter; doch bis jetzt bietet die Stringtheorie keine Erklärung für die beobachteten Werte der Konstanten.

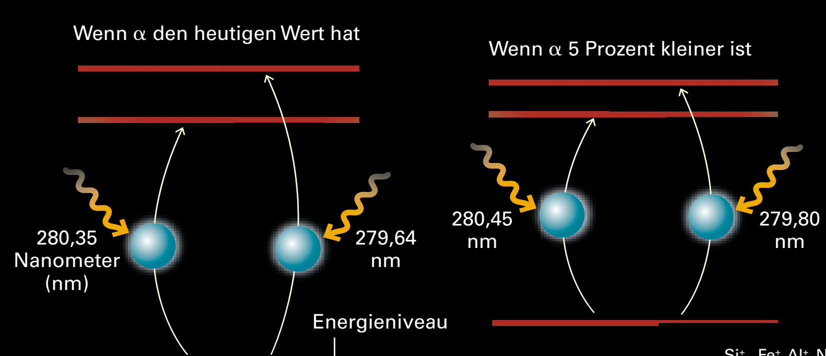
In der Tat könnte die Bezeichnung Konstante unzutreffend sein. Die scheinbar unveränderlichen Zahlenwerte könnten sowohl im Raum als auch in der Zeit ▷

Licht und die Feinstrukturkonstante

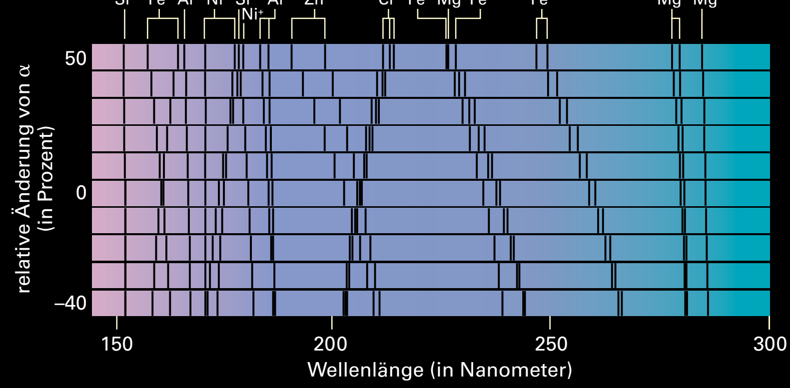
Die Feinstrukturkonstante Alpha (α) setzt sich aus mehreren Naturkonstanten zusammen, deren Werte experimentell sehr genau bestimmt werden können. Sie ist eine reine Zahl, die angibt, wie stark Teilchen über elektromagnetische Kräfte interagieren. Eine solche Wechselwirkung ist zum Beispiel die Absorption eines Photons durch ein Atom. Wenn man es mit Licht bestrahlt, absorbiert ein Atom Photonen bestimmter Wellenlänge, was sich im Farbspektrum als Absorptionslinie bemerkbar macht.



Energieniveaus der Elektronen in einem Atom bestimmen den Absorptionsprozess. Die Energie eines Photons wird auf ein Elektron übertragen, das daraufhin auf ein höheres erlaubtes Energieniveau springt. Jedem möglichen Sprung entspricht eine bestimmte Wellenlänge. Die Niveauabstände hängen von der Stärke der Anziehungskraft des Atomkerns auf das Elektron ab und damit von der Feinstrukturkonstanten. Falls α kleiner wäre, lägen zum Beispiel die Niveaus eines Magnesiumions (Mg^+) näher beieinander. Photonen könnten dann mit geringerer Energie – mit größerer Wellenlänge – Elektronen auf höhere Niveaus heben.



Simulierte Spektren zeigen, wie Änderungen von α die Absorption von Licht im nahen Ultraviolettbereich in verschiedenen Atomarten beeinflussen. Die vertikalen schwarzen Linien stellen die absorbierten Wellenlängen dar. Jede Atom- oder Ionenart weist ein eindeutiges Absorptionslinienmuster auf. Änderungen der Feinstrukturkonstanten beeinflussen Magnesium und Silizium weniger als Eisen, Zink oder Chrom.



ALISON KENDALL NACH: JOHN K. WEBB

variieren. Falls sich die Größe der zusätzlichen Raumdimensionen ändern sollte, würden sich die »Konstanten« unserer dreidimensionalen Welt mit ihnen verändern. Und wenn wir nur genügend weit in den Weltraum blicken, könnten Regionen auftauchen, in denen die »Konstanten« andere Werte eingenommen haben. Schon in den 1930er Jahren spekulierten manche Wissenschaftler darüber, ob die Konstanten wirklich unveränderlich sind. Die Stringtheorie verleiht dieser Idee eine theoretische Stütze. Beobachter suchen deshalb nach Abweichungen der bisher als allgemeingültig angenommenen Werte.

Allerdings stellen solche Experimente eine Herausforderung dar. Das erste Problem hängt damit zusammen, dass die Messgeräte selbst von Änderungen der Konstanten beeinflusst sein könnten. Sollten sich etwa alle Atome im Lauf der Zeit ausdehnen und der Maßstab, mit dem sie gemessen werden, ebenfalls, wäre die Änderung nicht festzustellen.

Die Feinstrukturkonstante Alpha

Metrologen setzen zwar immer voraus, dass ihre Messstandards – Maßstäbe, Massen, Uhren – unveränderlich sind. Aber diese Annahme ist unzulässig, wenn Naturkonstanten überprüft werden sollen. Die Forscher müssen sich deshalb auf Konstanten konzentrieren, die dimensionslos, also reine Zahlen sind. Nur dann sind ihre Werte unabhängig vom Einheitensystem. Ein einfaches Beispiel ist das Verhältnis zweier Massen, wie etwa die Ruhemasse des Protons zur Ruhemasse des Elektrons. Ein besonders interessantes Verhältnis kombiniert die Lichtgeschwindigkeit *c*, die Elementarladung *e*, das Planck'sche Wirkungsquantum *h* und die Dielektrizitätskonstante des Vakuums ε_0. Diese berühmte Größe, $\alpha = e^2/2\varepsilon_0 hc$, heißt Feinstrukturkonstante. Arnold Sommerfeld, der als einer der Ersten quantenmechanische Prinzipien auf den Elektromagnetismus anwandte, hat sie 1916 eingeführt. Die Feinstrukturkonstante drückt die relativistischen (*c*) und quantenmechanischen Eigenschaften (*h*) der elektromagnetischen Wechselwirkung (*e*) zwischen geladenen Teilchen im leeren Raum (ε_0) aus. Ihr Wert beträgt 1/137,03599911 oder ungefähr 1/137. Unter Physikern hat die Zahl 137 einen geradezu legendären Ruf.

Wenn die Feinstrukturkonstante – die ein Maß für die Stärke der elektro-

Suche nach Änderungen im Licht von Quasaren

Eine ferne Gaswolke, die von einem noch ferneren Quasar beleuchtet wird, erlaubt es Astronomen, den Vorgang der Lichtabsorption im frühen Universum zu untersuchen und damit den damaligen Wert der Feinstrukturkonstanten zu bestimmen.

1 Vor Jahrmilliarden machte sich das im Spektrum kontinuierlich verteilte Licht eines Quasars auf die Reise zur Erde.

2 Sein Weg führt durch eine oder mehrere Gaswolken. Das Gas blockiert bestimmte Wellenlängen und im Spektrum entstehen Serien dunkler Absorptionslinien. Für die Untersuchung der Feinstrukturkonstanten konzentrieren sich die Astronomen auf die Absorption durch Metalle.

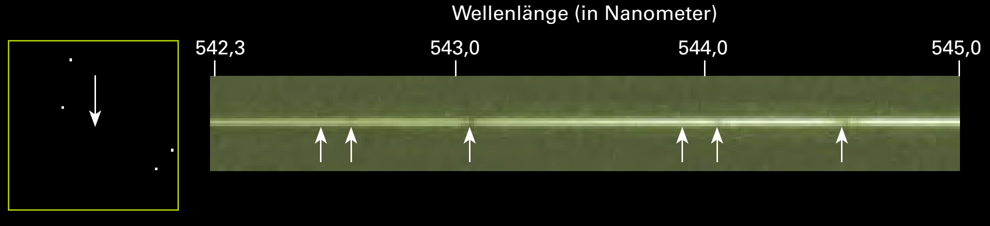
3 Durch die kosmische Expansion sind die Wellenlängen der Linien beim Eintreffen auf der Erde verschoben. Die Größe der Verschiebung ist ein Maß für die Entfernung der Wolke und somit für deren Alter.

4 Die Abstände der Spektrallinien können mit Labormessungen verglichen werden. Eine Abweichung ist ein Hinweis darauf, dass die Feinstrukturkonstante einst einen anderen Wert hatte.

Gasprobe

rotverschobenes Quasarspektrum

Laborspektrum



Absorptionslinien in einem Quasarspektrum, aufgenommen mit dem Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte Eso. Die Linien entstehen durch Gaswolken, die sich zwischen dem Quasar (Pfeil) und uns befinden. Ihre Positionen (ganz rechts) zeigen, dass das Licht vor 7,5 Milliarden Jahren durch die Wolken lief.

ALISON KENDALL

magnetischen Wechselwirkung, also für die Kopplung geladener Teilchen mit Photonen ist – einen anderen Wert hätte, würden sich alle entscheidenden Merkmale unserer Welt ändern. Wäre er niedriger, nähme die Dichte fester atomarer Materie ab (proportional zu α^3), Molekülbindungen würden bei tieferen Temperaturen aufbrechen (α^2), und die Anzahl stabiler Elemente im Periodensystem könnte zunehmen ($1/\alpha$). Falls α zu groß wäre, könnten kleine Atomkerne nicht existieren, weil die Abstoßung zwischen ihren positiv geladenen Protonen stärker wäre als die starke Kernkraft, die sie zusammenhält. Mit einem Wert von 0,1 würden selbst Kohlenstoffkerne zerplatzen. Kernprozesse in Sternen hängen besonders empfindlich von α ab. Damit Atomkerne verschmelzen können, müssen sie sich so schnell bewegen, dass sie eine Chance haben, ihre gegenseitige Abstoßung zu überwinden.

Das geht nur, wenn der Gravitationsdruck des Sterns für ausreichend hohe Temperaturen in seinem Innern sorgt. Für α größer als 0,1 wäre die Kernfusion unmöglich (sofern andere Parameter wie das Massenverhältnis von Elektron zu Proton nicht angepasst würden, um den Effekt zu kompensieren). Eine Änderung von α um nur vier Prozent würde die Energieniveaus der Kohlenstoffkerne derart verschieben, dass die Synthese dieses Elements in Sternen zum Erliegen käme.

Zu kurze Messzeit im Labor

Das zweite Problem ist noch schwieriger zu lösen. Um Variationen der Konstanten zu messen, sind hochpräzise Geräte notwendig, die lange genug stabil bleiben müssen, damit sie die Änderungen überhaupt erfassen. Selbst Atomuhren, die in 50 Millionen Jahren nur um eine Sekunde abweichen, können eine Drift der Feinstrukturkonstanten nur entdecken, wenn die Messzeit viele Tage oder Jahre beträgt. Falls sich α innerhalb von drei Jahren um mehr als vier Teile von 10^{15} änderte, würden die besten vorhandenen Atomuhren dies erkennen. Aber bislang wurde nichts Derartiges gefunden.

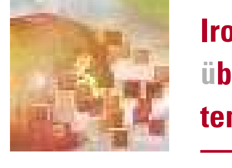
Das klingt wie ein überzeugender Beweis für die Unveränderlichkeit. Doch drei Jahre sind für den Kosmos nur ein winziger Augenblick. Langsame, aber signifikante Veränderungen in der langen Geschichte des Universums blieben mit der heutigen Messgenauigkeit unbemerkt. ▷

▷ Glücklicherweise haben Physiker andere Tests ersonnen. In den 1970er Jahren fanden Wissenschaftler der französischen Atomenergiebehörde im Erz einer Uranmine in Oklo (Gabun, Westafrika) eine merkwürdige Isotopenverteilung: Sie ähnelte derjenigen von abgebrannten Brennstäben heutiger Kernreaktoren. Vor zwei Milliarden Jahren muss in der Oklo-Erzlagerstätte auf natürliche Weise eine nukleare Kettenreaktion stattgefunden haben. 1976 erkannte Alexander Schljachter vom Institut für Kernphysik im russischen Sankt Petersburg, dass der Wirkungsgrad eines solchen natürlichen Reaktors entscheidend von der Energie eines bestimmten Zustands des Samariumkerns abhängt, der den Einfang von Neutronen erleichtert. Und diese Energie wiederum hängt empfindlich von α ab. Wenn die Feinstrukturkonstante einen geringfügig anderen Wert gehabt hätte, wäre keine Kettenreaktion zu Stande gekommen. Da sie aber stattfand, bedeutet dies, dass sich α in den letzten zwei Milliarden Jahren maximal um ein Teil in 10^8 geändert hat.

1962 bereits hatten P. James E. Peebles und Robert Dicke von der Universität Princeton als Erste ein ähnliches Verfahren auf Meteoriten angewandt: In diesen urzeitlichen Brocken hängen die Häufigkeitsverhältnisse verschiedener Isotope, die im Zuge der radioaktiven Zerfallsketten entstehen, von α ab. Die empfindlichste Einschränkung liefert der Betazerfall von Rhenium zu Osmium. Nach neuesten Untersuchungen eines Teams um Keith Olive von der Universität von Minnesota in Minneapolis und Maxim Pospelov von der Universität Victoria (Kanada) kann α zur Zeit der Entstehung der Meteoriten höchstens um zwei Teile von 10^6 vom heutigen Wert abgewichen sein. Diese Ergebnisse sind zwar weniger genau als die Oklo-Daten, reichen dafür aber weiter in die Vergangenheit zurück, bis zur Entstehung des Sonnensystems vor 4,6 Milliarden Jahren.

Um mögliche Änderungen über noch längere Zeiträume festzustellen, müssen die Forscher den Blick in den Himmel richten. Das Licht ferner astronomischer Quellen ist teilweise Milliarden von Jahren unterwegs, bevor es unsere Teleskope erreicht. Mit sich führt es eine Momentaufnahme der physikalischen Gesetze und Konstanten aus der Zeit, als es seine Reise begann oder unterwegs auf Materie traf.

Erstmals kam die Astronomie 1965 mit der Frage der Naturkonstanten in Berührung, kurz nachdem die Quasare entdeckt worden waren. Die Überlegung war einfach. Die neuartigen Himmelskörper waren als sehr ferne, gleißend helle Lichtquellen identifiziert worden. Wegen des langen Wegs vom Quasar bis zu uns muss das Licht unweigerlich die gasförmigen Außenbereiche junger Galaxien durchqueren. Dieses Gas absorbiert das Licht des Quasars bei bestimmten Frequenzen und drückt seinem Spektrum einen Strichcode aus schmalen Absorptionslinien auf (siehe Kasten auf S. 81).



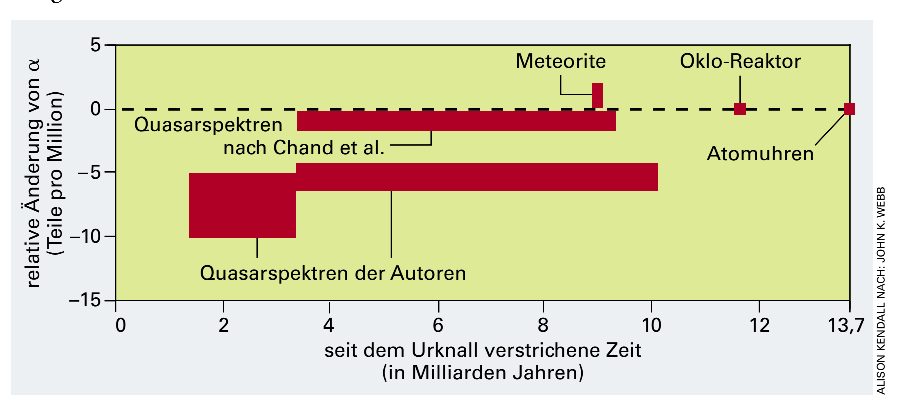
Ironischerweise wussten Wissenschaftler mehr über Spektren von Milliarden Lichtjahren entfernten Quasaren als über die von irdischen Proben

Verräterische Spektrallinien

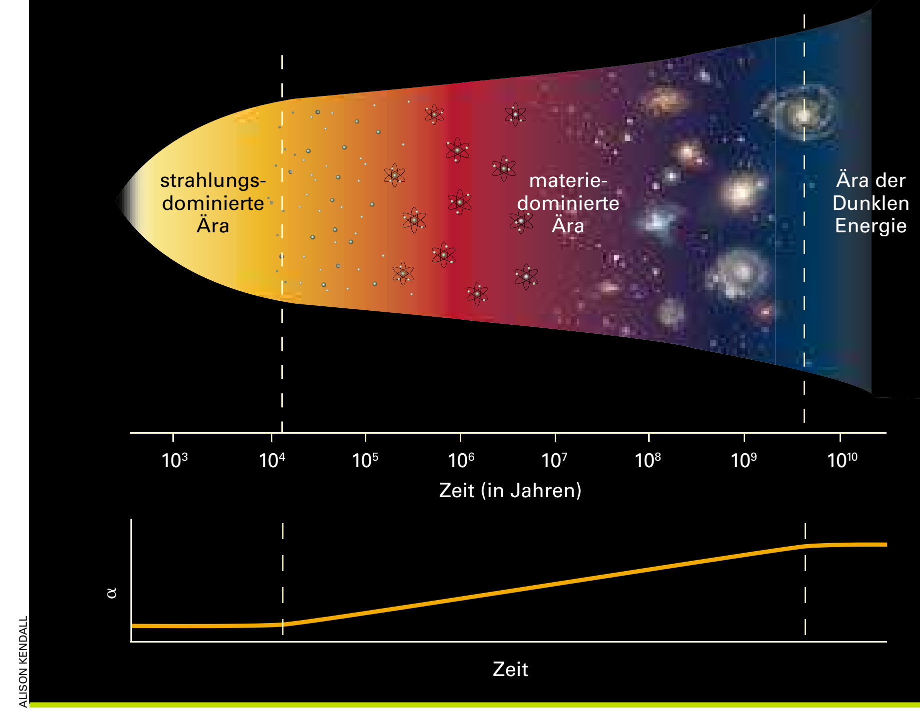
Wann immer Gas Licht absorbiert, springt im Atom ein Elektron von einem niedrigeren in einen höheren Energiezustand. Die Lage dieser Energieniveaus wird davon bestimmt, wie stark der Atomkern die Elektronen anzieht. Dies hängt wiederum von der Stärke der elektromagnetischen Kraft zwischen ihnen ab – und somit von der Feinstrukturkonstanten. Falls zum Zeitpunkt der Absorption des Lichts oder in dem betreffenden Raumbereich α einen anderen Wert hatte, unterscheidet sich die Energie, die benötigt wird, um das Elektron anzuheben, von den heute im Labor gemessenen Werten. Die in den Spektren beobachteten Wellenlängen der Übergänge würden somit differieren. Die Art und Weise der Wellenlängenänderungen hängen empfindlich von den Orbitalkonfigurationen der Elektronen ab. Für eine bestimmte Änderung von α verkürzen sich einige Wellenlängen, während andere anwachsen. Das resultierende Muster im Spektrum ist so komplex, dass es schwerlich durch einen Kalibrierungsfehler vorgetäuscht werden könnte. Dadurch ist der Test erstaunlich leistungsfähig.

Bevor unser Team vor sieben Jahren seine Arbeit aufnahm, litten die Messungen unter zwei Einschränkungen. Zum einen waren die Laborwellenlängen vieler relevanter Spektrallinien nicht genau genug bekannt. Ironischerweise wussten die Wissenschaftler mehr über die Spektren von Milliarden Lichtjahren entfernten Quasaren als über die Referenzspektren von Proben hier auf der Erde. Was wir brauchten, waren sehr präzise Labormessungen, die wir mit unseren Quasarspektren vergleichen konnten. Auf unsere Anregung hin führten Anne Thorne und Juliet Pickering vom Imperial College in London erste Messungen durch. Weitere Daten lieferten Gruppen um Sveneric Johansson von der Sternwarte Lund (Schweden) und um Ulf Griesmann und Rainer Kling vom National Institute of Standards and Technology in Gaithersburg (Maryland).

Messungen der Feinstrukturkonstanten sind nicht eindeutig. Einige weisen darauf hin, dass sich die Konstante im Lauf der Zeit ändert, andere nicht. Möglicherweise fanden die Änderungen nur während früherer Epochen des Kosmos statt, aber nicht mehr heute.



Sie ändert sich, sie ändert sich nicht ...



Nach der Theorie der Autoren blieb die Feinstrukturkonstante während gewisser Epochen in der kosmischen Geschichte konstant, nahm aber in anderen zu. Die Messdaten (siehe Kasten unten links) sind mit dieser Vorhersage vereinbar.

Das zweite Problem hing damit zusammen, dass frühere Beobachter so genannte Alkali-Doublett-Absorptionslinien untersuchten. Das sind paarweise auftretende Absorptionslinien eines Gases, wie bei Kohlenstoff oder Silizium. Die Forscher verglichen die Abstände zwischen diesen Linien in Quasarspektren mit denen im Labor. Allerdings wird bei diesem Verfahren eine bestimmte Eigenschaft ignoriert: Eine Änderung von α beeinflusst nicht nur den Abstand der Absorptionslinien relativ zum niedrigsten Energieniveau, dem Grundzustand, sondern auch die absolute Position des Grundzustands. Deshalb lag die Genauigkeit der bisherigen Beobachtungen höchstens bei einem Teil in 10^4.

1999 ersannen einer von uns (Webb) und Victor V. Flambaum von der Universität von New South Wales in Sydney (Australien) eine Methode, mit der sich sowohl die relative als auch die absolute Verschiebung der Absorptionslinien ermitteln lässt. Das war der Durchbruch und bedeutete eine zehnfach höhere Empfindlichkeit. Zudem können wir mit diesem Verfahren unterschiedliche Atomsorten (zum Beispiel Magnesium und Eisen) vergleichen, was zusätzliche Gegenproben ermöglicht. Aber für die Umsetzung dieser Idee in die Praxis waren komplizierte numerische Berechnungen notwendig, um herauszufinden, wie in allen verschiedenen Atomarten die beobachteten Wellenlängen von α abhängen. Unter der Verwendung moderner Teleskope und Detektoren erlaubte uns der neue Ansatz, die Many-Multiplet-Analyse (kurz: MM-Analyse), die Konstanz von α mit noch nie da gewesener Genauigkeit zu untersuchen.

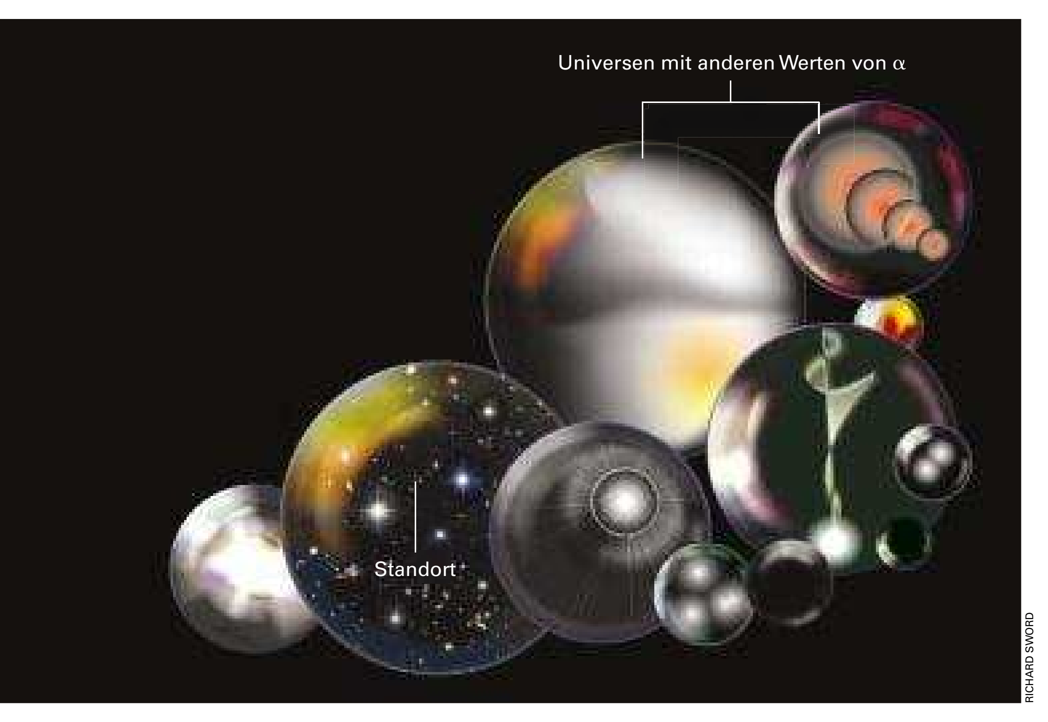
Zu Beginn unseres Projekts hatten wir noch keinen Anlass, an der Unveränderlichkeit der Feinstrukturkonstanten zu zweifeln. Wir erwarteten, in der Frühzeit unseres Universums für α denselben Wert zu finden wie heute, nur würden unsere Messungen genauer sein als zuvor. Zu unserer Überraschung zeigten erste Ergebnisse im Jahr 1999 kleine, aber statistisch signifikante Unterschiede. Weitere Messungen bestätigten diesen Befund. Auf der Grundlage von 128 Quasarabsorptionslinien errechneten wir eine mittlere Zunahme von α um nahezu sechs Teile pro Million während der letzten sechs bis zwölf Milliarden Jahre.

Außergewöhnliche Behauptungen erfordern außergewöhnliche Beweise. Unser erster Verdacht richtete sich deshalb auf mögliche Fehler in den Daten oder in den Analysemethoden. Diese Unsicherheiten lassen sich in zwei Gruppen einordnen: systematische und zufällige. Letztere sind leichter zu verstehen; sie sind eben einfach das, was ihr Name besagt: zufällig. Jede Einzelmessung unterscheidet sich etwas von den anderen, für große Datenmengen indes heben sich diese Abweichungen im Mittel gegenseitig fast auf. Systematische Abweichungen hingegen mitteln sich nicht weg und sind deshalb schwieriger in den Griff zu bekommen. In der Astronomie lauern sie überall. Experimentatoren im Labor können ihre Apparatur modifizieren, um systematische Fehler zu erkennen und zu beseitigen, aber Astronomen können das Universum nicht ändern. Sie müssen deshalb akzeptieren, dass alle ihre Untersuchungsmethoden unter unvermeidlichen Auswahleffekten leiden. Beispielsweise werden in jeder Durchmusterung des Himmels helle Galaxien überrepräsentiert sein, einfach, weil diese leichter zu sehen sind als lichtschwache. Solche Auswahleffekte zu identifizieren und zu neutralisieren ist eine ständige Herausforderung.

Zunächst prüften wir, ob die Wellenlängenskala, mit deren Hilfe wir die Spektrallinien der Quasare vermaßen, eine Verzerrung aufwies. Eine solche könnte beispielsweise auftreten, wenn wir die Rohdaten der Quasare in kalibrierte Spektren umrechnen. Obwohl eine einfache Streckung oder Stauchung der Wellenlängenskala eigentlich keine Änderung von α vortäuschen kann, könnten solche Diskrepanzen durchaus ausreichen, unsere Ergebnisse zu erklären. Zur Eingrenzung dieser Probleme ersetzten wir Quasardaten durch Kalibrierungsmessungen und analysierten sie so, als ob sie Quasardaten seien. Dadurch konnten wir einfache Verzerrungen als Fehlerquelle mit hoher Sicherheit ausschließen.

Vortäuschen einer Änderung

Zwei Jahre lang suchten wir intensiv nach anderen Fehlern in den Daten. Wir stellten einen potenziellen Auswahleffekt nach dem anderen auf den Prüfstand, nur um ihn nach detaillierten Analysen als unbedeutend wieder auszuschließen. Bislang vermochten wir nur eine mögliche ernsthafte Fehlerquelle zu identifizieren. Sie betrifft die Absorptionslinien des Elements Magnesium. Jedes seiner drei ▷



Unser beobachtbares Weltall ist vermutlich nur ein kleiner Teil eines Multiversums. In anderen Regionen dieser Vielwelt kann die Feinstrukturkonstante andere Werte annehmen als in unserer – mit der Folge, dass die Naturgesetze surreale Formen annehmen und sich Leben nicht entwickeln kann.

stabilen Isotope absorbiert Licht einer anderen Wellenlänge, aber die drei Linien liegen sehr nahe beieinander. In Quasarspektren sind sie gewöhnlich zu einer einzigen Linie verschmolzen. Legt man die im Labor gemessenen relativen Häufigkeiten der drei Isotope zu Grunde, lässt sich auf die einzelnen Beiträge der Linien schließen. Falls aber im jungen Universum andere Häufigkeiten galten, könnte dies eine Änderung von α vortäuschen. Das könnte dann der Fall sein, wenn die Sterne, die damals das Magnesium in ihrer Galaxie verteilten, im Mittel massereicher waren als heute.

Wird Alpha durch die kosmische Expansion beeinflusst?

Aber eine Studie, die in diesem Jahr veröffentlicht wurde, zeigt, dass unsere Befunde nicht so einfach wegdiskutiert werden können. Yeshe Fenner und Brad K. Gibson von der Technischen Universität Swinburne in Melbourne (Australien) sowie Michael T. Murphy von der Universität Cambridge (England) fanden heraus: Wäre die von uns gemessene Abweichung von α auf eine andere Magnesiumhäufigkeit zurückzuführen, würde daraus auch eine Überproduktion an Stickstoff im frühen Universum resultieren. Das aber widerspricht den Beobachtungen. Deshalb müssen wir die Möglichkeit in Betracht ziehen, dass sich α tatsächlich verändert hat.

Die wissenschaftliche Gemeinschaft erkannte schnell die immense mögliche Bedeutung unserer Ergebnisse. Weltweit nahmen Forschergruppen eiligst ihre eigenen Quasarspektren auf. Teams um Sergej Lewschakow vom Ioffe-Institut in St. Petersburg (Russland) und um Ralf Quast von der Universität Hamburg untersuchten 2003 drei neue Quasarsysteme. Letztes Jahr analysierten Hum Chand und Raghunathan Srianand vom Interuniversitären Zentrum für Astronomie und Astrophysik in Puna (Indien), Patrick Petitjean vom Institut für Astrophysik und Bastien Aracil vom Forschungszentrum Lerma (beide in Paris) 23 weitere. Keine dieser Gruppen fand eine Veränderung von α. Chand vermutete, dass irgendwelche Änderungen in den letzten sechs bis 10 Milliarden Jahren kleiner als 1 Teil pro 10^6 gewesen sein müssen.

Wie kann eine ähnlich geartete Untersuchung, nur mit anderen Daten, zu einem derart anderen Ergebnis führen? Nun, wir kennen die Antwort noch nicht. Die Daten dieser Forschungsgruppen sind von ausgezeichneter Qualität. Aber ihre Datenmenge ist kleiner und reicht nicht so weit in der Zeit zurück wie unsere. Die Untersuchung der Chand-Gruppe hat nicht alle experimentellen und systematischen Fehlerquellen berücksichtigt. Da sie eine vereinfachte Version der MM-Analyse verwendeten, könnten sie selbst neue Fehler eingeführt haben.

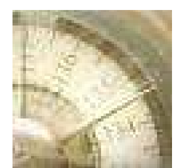
Der renommierte Astrophysiker John Bahcall von der Universität Princeton kritisierte die Many-Multiplet-Analyse selbst. Aber die von ihm identifizierten Probleme sind zufälliger Natur und sollten folglich bei großen Datenmengen verschwinden. Um das zu überprüfen, untersuchten Bahcall sowie eine Gruppe um Jeffrey Newman vom Lawrence-Berkeley-Nationallaboratorium (Kalifornien) Emissionslinien anstatt Absorptionslinien. Bislang ist ihr Ansatz noch nicht genau genug, aber er könnte in der Zukunft nützliche Randbedingungen liefern.

Falls unser Befund bestätigt werden sollte, hätte dies enorme Konsequenzen, die noch gar nicht alle abzusehen sind. Bis vor Kurzem waren alle Überlegungen, wie eine veränderte Feinstrukturkonstante das Schicksal des Universums beeinflussen sollte, wenig überzeugend. Meist mündeten sie in der Annahme, man könne dieselben Gleichungen wie bisher benutzen, nur dass α nun als Variable statt als Konstante zu betrachten sei. Das ist eine zweifelhafte Vorgehensweise. Wenn α variiert, müssen bei allen Änderungen Energie und Impuls erhalten bleiben und sie müssen das Gravitationsfeld im Universum beeinflussen. Erstmals gelang es 1982 Jacob D. Bekenstein von der Hebräischen Universität in Jerusalem, die Gesetze des Elektromagnetismus zu verallgemeinern, sodass sie auch für wechselhafte »Konstanten« gelten. Die Theorie behandelt α nicht mehr wie eine reine Zahl, sondern wie ein skalares Feld, dessen Wert von Ort und Zeit abhängig ist. Was in seiner Theorie noch fehlte, war die Gravitation. Erst vor vier Jahren gelang es einem von uns (Barrow) mit Håvard Sandvik und João Magueijo vom Imperial College in London, Bekensteins Theorie dahingehend zu erweitern.

Die neue Theorie macht ansprechend einfache Vorhersagen. Änderungen von α um wenige Teile pro Million sollten keinen merklichen Effekt auf die kosmische Expansion haben. Das liegt daran, dass auf kosmischen Skalen der Elektromagnetismus viel schwächer ist als die Schwerkraft. Doch umgekehrt sollte sich die Expansion auf α auswirken, und

zwar hervorgerufen durch Ungleichgewichte zwischen den Energien des elektrischen und des magnetischen Felds.

Während der ersten 300 000 Jahre in der Geschichte des Kosmos dominierte die Strahlung über die geladenen Teilchen und hielt die elektrischen und magnetischen Felder im Gleichgewicht. Als das Universum sich weiter ausdehnte, nahm die Strahlungsdichte ab und im Universum dominierte fortan die Materie. Die elektrischen und magnetischen Energien wurden ungleich und α begann, sehr langsam zuzunehmen. Die Wachstumsrate folgte dem Logarithmus der Zeit. Vor etwa sechs Milliarden Jahren übernahm die Dunkle Energie die Führungsrolle und beschleunigte die Expansion. Dadurch wurde es für alle physikalischen Einflüsse schwieriger, sich im Raum auszubreiten. Deshalb wurde α wieder nahezu konstant.



Falls die Feinstrukturkonstante Alpha für Änderungen anfällig ist, sollten sich andere Naturkonstanten ebenfalls ändern

Hatte Galilei doch Unrecht?

Dieses Vorhersagemuster passt zu unseren Beobachtungen. Die Spektrallinien in den Quasarspektren repräsentieren die materiedominierte Epoche der kosmischen Geschichte, als α zunahm. Die Labor- und Oklo-Befunde fallen in eine spätere Epoche, in der die Dunkle Energie dominierte und α konstant blieb. Die Frage, inwieweit sich eine veränderte Feinstrukturkonstante auf die radioaktiven Elemente in Meteoriten auswirkte, ist besonders interessant, weil sich daraus Aussagen über die Übergangsphase zwischen den beiden Epochen ableiten lassen.

Jede Theorie muss, um ernst genommen werden zu können, nicht nur die Beobachtungen reproduzieren, sondern auch überprüfbare Vorhersagen machen. Unserer Theorie zufolge sollten Variationen der Feinstrukturkonstanten dafür sorgen, dass Körper im Schwerefeld unterschiedlich fallen. Galileo Galilei sagte vorher, dass im Vakuum Körper immer gleich schnell fallen, unabhängig davon, woraus sie bestehen. Dies wird das schwache Äquivalenzprinzip genannt. Der Astronaut David Scott von Apollo 15 demonstrierte das, als er auf dem Mond eine Feder und einen Hammer fallen ließ und beide Gegenstände gleichzeitig im Mondstaub landeten. Aber falls sich α ändert, gilt dieses Prinzip nicht mehr exakt. Die Änderungen erzeugen eine Kraft auf alle geladenen Teilchen. Je mehr Protonen in einem Atomkern sind, desto stärker spüren die Atome diese Kraft. Wenn unsere Quasarbeobachtungen richtig sind, unterscheidet sich die Beschleunigung unterschiedlicher Materialien um einen Teil in 10^{14}. Das ist rund 100-mal kleiner, als im Labor gemessen werden kann, aber groß genug, um von geplanten Raumfahrtmissionen wie etwa Step *(space-based test of the equivalence principle)* erkannt zu werden.

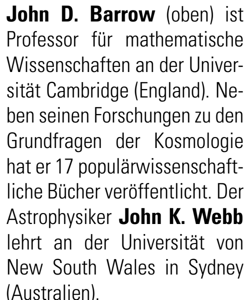
Die Geschichte enthält noch eine letzte Schwierigkeit. Bisherige Untersuchungen über eventuelle Variationen von α ignorierten einen wichtigen Umstand: die Klumpigkeit des Universums. Wie alle anderen Galaxien ist unser Milchstraßensystem etwa eine Million Mal dichter als der Kosmos im Mittel. Dabei wird es durch die gegenseitige Anziehung seiner Massen zusammengehalten und beteiligt sich deshalb nicht an der allgemeinen Expansion des Universums. 2003 berechneten Barrow und David F. Mota aus Cambridge, dass sich α innerhalb unserer Galaxis anders verhalten könnte als in den nahezu leeren Bereichen des Alls. Wenn eine junge Galaxie nach ihrer Ausformung einen Gleichgewichtszustand erreicht hat, verändert sich α in ihr kaum, aber außerhalb davon immer noch. Somit unterliegen irdische Experimente zur Prüfung der Konstanz von α einem Auswahleffekt. Diesen müssen wir näher untersuchen, um herauszufinden, wie er die Tests des schwachen Äquivalenzprinzips beeinflusst. Bislang wurde keine räumliche Variation von α entdeckt. Barrow wies kürzlich nach, dass wegen der Gleichmäßigkeit der kosmischen Hintergrundstrahlung α zwischen Regionen, die am Himmel um 10 Grad auseinander liegen, nicht mehr als um einen Teil in 10^8 variiert.

Es stellt sich nun die Frage, wo bei diesen vielfältigen Überlegungen der wissenschaftliche Boden verlassen wird, zumindest was α betrifft. Momentan warten wir auf neue Daten und neue Analysen, welche die Variation von α entweder bestätigen oder widerlegen. Die Wissenschaftler konzentrieren sich bei diesen Untersuchungen auf die Feinstrukturkonstante, weil astronomische Beobachtungen über sie genauere Ergebnisse liefern als über andere Naturkonstanten. Falls α anfällig für Änderungen ist, dann sollten sich andere Konstanten ebenfalls ändern. In diesem Fall sind die grundlegenden Mechanismen der Natur variantenreicher als Wissenschaftler je vermuteten.

Um die Naturkonstanten rankt sich ein faszinierendes Geheimnis. In jeder Gleichung der Physik tauchen sie auf. Sie sind so nüchtern, dass man dazu neigt zu vergessen, wie unerklärlich ihre Werte sind. Ihr Ursprung ist eng mit den größten Rätseln der modernen Wissenschaft verbunden, von der Vereinheitlichung der Physik bis zur Expansion des Universums. Vielleicht sind sie nur das schattenhafte Abbild einer Struktur, die größer und viel komplexer als das dreidimensionale Universum ist, das wir kennen. Zu entscheiden, ob die Konstanten tatsächlich ihren Namen zu Recht tragen, ist nur ein kleiner Schritt auf dem Weg zu einem wirklichen Verständnis der Welt. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE





John D. Barrow (oben) ist Professor für mathematische Wissenschaften an der Universität Cambridge (England). Neben seinen Forschungen zu den Grundfragen der Kosmologie hat er 17 populärwissenschaftliche Bücher veröffentlicht. Der Astrophysiker **John K. Webb** lehrt an der Universität von New South Wales in Sydney (Australien).

Das absolut Unveränderliche. Die letzten Rätsel der Physik. Von Harald Fritzsch. Piper 2005

Das 1×1 des Universums. Neue Erkenntnisse über die Naturkonstanten. Von John D. Barrow. Campus 2004

A simple cosmology with a varying fine structure constant. Von H. B. Sandvik, J. D. Barrow und J. Magueijo in: Physical Review Letters, Bd. 88, Paper Nr. 031302, 2. Januar 2002

Further evidence for cosmological evolution of the fine structure constant. Von J. K. Webb et al. in: Physical Review Letters, Bd. 87, Heft 9, Paper Nr. 091301, 27. August 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Laien erforschen die Welt

Nichtfachleute ab einem Alter von 16 Jahren können sich bei »Earthwatch« aktiv an wissenschaftlichen Projekten beteiligen – als sinnvolle Alternative zu einem herkömmlichen Urlaub, die kaum teurer ist.



wissenschaft in die schulen!

Wollen Sie Ihren Schülern einen Anreiz zu intensiver Beschäftigung mit der Wissenschaft geben? »Wissenschaft in die Schulen!« bietet teilnehmenden Klassen einen Klassensatz **»Spektrum der Wissenschaft«** oder **»Sterne und Weltraum«** kostenlos für ein Jahr, dazu didaktisches Material und weitere Anregungen.
www.wissenschaft-schulen.de

Von Michael Groß

Du bist eine Schülerin in der Oberstufe und weißt nicht, ob du eine akademische Karriere in einem naturwissenschaftlichen Fach anstreben sollst, weil du dir keine rechte Vorstellung von der späteren Forschungstätigkeit machen kannst? Oder sind Sie ein Rechtsanwalt, der gerne einmal dem Paragrafendschungel entfliehen und im echten Urwald die Faszination wissenschaftlicher Forschung erleben würde? Ihnen beiden kann geholfen werden – durch eine Organisation namens Earthwatch. Voraussetzung sind nur gute Englischkenntnisse und genügend Kleingeld.

Ein ganz normaler Earthwatch-Tag sieht ziemlich bunt aus. In Queensland (Australien) studiert eine Gruppe von Laien das Verhalten von Koalabären in freier Wildbahn. In der Mongolei beobachtet ein anderes Team Argalis, die größten Bergschafe der Welt. In Sri Lanka folgen Freiwillige einer Schar von Makaken, während in Madagaskar Earthwatch-Helfer Lemuren ins Visier nehmen. Vor der spanischen Mittelmeerküste hält das Forschungsschiff Toftevaag nach Delfinen Ausschau. Auch in einem Flussdelta in Brasilien werden die Meeressäuger beäugt. Zur selben Zeit kämpft sich in Peru ein Trupp auf der Suche nach Aras durch den Regenwald und sammeln Helfer in der Salzwüste in Utah Daten über Wirbellose und Amphibien. In Baja California (Mexiko) beschützt eine Earthwatch-Gruppe frisch geschlüpfte Meeresschildkröten, während Freiwillige in Churchill an der Hudson-Bai durch den Schnee stapfen, um Messungen zur Klimaveränderung durchzuführen. Schließlich assistiert ein weiteres Team in Hawaii bei Ausgrabungen an einer historischen Zuckerplantage am Fuß des 4000 Meter hohen Vulkans Mauna Loa.

Aus der Not geboren

Earthwatch entstand 1971 in Boston (Massachusetts). Damals zwangen Kürzungen im Forschungsetat der US-Regierung Wissenschaftler dazu, nach neuen Finanzierungsmodellen für ihre Projekte zu suchen. Im ersten Jahr nahmen vier Forscher der Smithsonian Institution insgesamt 39 Freiwillige unter ihre Fittiche. Heute, drei Jahrzehnte später, beteiligen sich durchschnittlich 3500 Helfer an 140 Projekten in 50 Ländern rund um den Globus.

Als Forschungsschwerpunkt von Earthwatch schälte sich bald der Bereich Ökologie, Umwelt- und Artenschutz heraus; in geringerem Umfang ist die Organisation aber auch in der Archäologie, Paläontologie und Anthropologie aktiv. Auf all diesen Gebieten unterstützt sie ausgewählte Projekte durch Bereitstellung freiwilliger Helfer sowie mit Geld. Im Gegensatz zu anderen Umweltverbänden hat Earthwatch auch keine Berührungsängste gegenüber der Wirtschaft und bemüht sich um Förderung durch zahlungskräftige Unternehmen.

Seit 1990 unterhält die Organisation eine Europa-Zweigstelle, deren Hauptquartier in Oxford mit rund fünfzig fest angestellten Mitarbeitern inzwischen genauso groß ist wie die Zentrale in Maynard (Massachusetts). Weitere Büros existieren in Japan und Australien. Alle zusammen offerieren alljährlich ein weltumspannendes Programm mit rund 140 Expeditionen. Zusätzlich organisiert jede Zweigstelle im Rahmen eines so genannten *discovery program* auch kleinere Projekte sowie gelegentlich Vorträge und Schnuppertage für Interessierte.

Obwohl Earthwatch insgesamt über hundert Angestellte beschäftigt, werden diese nicht müde zu beteuern, dass die freiwilligen Helfer der wichtigste Bestandteil der Organisation sind. Sie kom-

ALLE FOTOS: EARTHWATCH

Vor der spanischen Mittelmeerküste beobachten Earthwatch-Helfer auf einem norwegischen Zweimaster Delfine und überwachen deren Bestand.

men aus vielen verschiedenen Ländern, Kulturen, und Gesellschaftsschichten. Seit 1971 haben mehr als 65000 Menschen an Earthwatch-Projekten teilgenommen. Sie rekrutieren sich gleichmäßig aus allen Altersgruppen ab dem Mindestalter von 16 Jahren.

Die Helfer müssen sich selbst um die Anreise zum Treffpunkt kümmern, wo sie von den Projektleitern oder festen Mitarbeitern empfangen werden. Zunächst erhalten sie eine gründliche Einführung in die Methoden und Hintergründe der Arbeit, was bis zu drei Tage dauert. Die Aufgaben selbst sind in jedem Projekt anders. Manchmal ist körperliche Fitness verlangt – zum Beispiel bei Forschungen in den Höhenlagen der Anden. Für einige wenige Expeditionen brauchen die Teilnehmer eine Tauchausbildung. Doch in den allermeisten Fällen kann jeder mitmachen, der gesund und in der Lage ist, zu verreisen und zwei Wochen tüchtig zu arbeiten.

Gerade für junge Menschen bietet die Teilnahme an solchen Projekten eine enorme Erweiterung ihres Erfahrungsschatzes. Das bezeugt etwa die 24-jährige Jenny Cox, die nach dem Studium der Betriebswirtschaft und der französischen Sprache im Dezember 2004 an einem Vogelschutz-Projekt in Kamerun teilnahm. Wie sie erklärt, hatte sie sich schon immer für Naturschutz interessiert, aber vorher nicht gedacht, dass sie ohne eine wissenschaftliche Ausbildung zum Erkenntnisfortschritt in diesem Bereich beitragen könnte. »Die Teilnahme an dem Projekt hat mir gezeigt, dass man nicht unbedingt ein Experte sein muss, um wissenschaftliche Arbeit zu leisten. Der leitende Forscher vermittelte mir alles, was ich an Ausbildung brauchte, um an dem Vorhaben mitzuwirken, und das hat mein Selbstvertrauen gestärkt. Jetzt spiele ich mit dem Gedanken, eine formelle Qualifikation im Bereich Naturschutz anzustreben.«

Die Freiwilligen zahlen nicht nur ihren Unterhalt selbst, sondern leisten auch einen Kostenbeitrag, der das Forschungsprojekt und die ganze Organisation finanziert. Deshalb erscheinen die Expeditionen zunächst recht teuer – meist sind 1000 bis 2000 Euro pro Kopf für zwei Wochen zu zahlen, zuzüglich Anreise. Andererseits können Schüler und Studierende sowie Teilnehmer aus Entwicklungsländern auch Stipendien erhalten. So vergibt Earthwatch Europe in regelmäßigen Abständen »Education Awards« von 500 britischen Pfund (knapp 750 Euro) für junge Expeditionsteilnehmer. Ausschlaggebend bei der Auswahl der Stipendiaten sind die Motivation der Bewerber und ihre Ideen, wie sie die Erfahrungen aus dem Projekt Mitschülern, Kommilitonen oder einem breiteren Publikum vermitteln wollen.



Ein Team von Earthwatch erforscht auf den Bahamas den Einfluss des Tourismus auf küstennahe Ökosysteme.

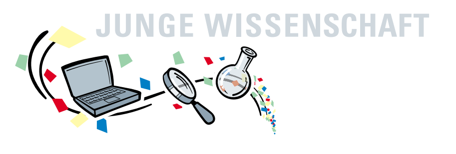
Als kostengünstigen Einstieg in die Earthwatch-Aktivitäten kann man sich aber auch eine Aktion aus dem Discovery-Programm aussuchen. »Es muß nicht unbedingt Afrika sein – wenn man nur danach sucht, findet man auch in heimischen Wäldern zahlreiche Spuren von Wildtieren«, berichtet die aus Österreich stammende Stefanie Riemer, die an der Anglia Polytechnic University in Cambridge Umwelt- und Verhaltensbiologie studiert. Nach ihrem ersten Studienjahr arbeitete sie im September 2004 an dem Projekt »Mammals of Wytham Woods« in der Nähe von Oxford mit. Die Teilnahme kostet nur 475 Euro. Dafür dürfen bis zu zwölf Freiwillige sechs Tage lang unter Anleitung der Oxforder Zoologen Chris Newman und Christina Buesching Säugetiere von Wühlmäusen bis hin zu Dachsen beobachten.

Schutz von Krähen und Lemuren

Was hat Earthwatch begeisterten Hobbywissenschaftlern außerdem zu bieten? Um Ihnen einen kleinen Eindruck zu verschaffen, möchte ich drei typische Beispiele bringen. Das erste ist das schon erwähnte Vogelschutzprojekt im zentralafrikanischen Kamerun. Guillaume Dzikouk von der »Cameroon Biodiversity Conservation Society« (CBCS) studiert seit drei Jahren mit Hilfe von Earthwatch-Freiwilligen die Situation der vom Aussterben bedrohten Buntkopf-Stelzenkrähe *(Picathartes oreas)* im Bergland nordwestlich der Hauptstadt Jaunde. Man vermutet, dass es nur noch wenige tausend Exemplare dieser Vögel gibt und dass die Population durch die vom Menschen verursachte Zerstörung des Lebensraums weiter schrumpft.

Bevor die Freiwilligen anreisen, treten die Forscher in Kontakt mit den einheimischen Jägern, um mögliche Nistplätze der Vögel zu erfahren und die ansässige Bevölkerung über das Vorhaben zu informieren. Die sechs bis acht Helfer eines Teams werden nach ihrer Ankunft in Jaunde zunächst einen Tag lang in die Aufgaben eingewiesen. Dann verbringen sie zweimal fünf Tage im Forschungsgebiet. Dabei kampieren sie in Zelten. Dazwischen gibt es einen Ruhetag in der Hauptstadt, wo ein Hotel mit Duschen und anderen Errungenschaften der Zivilisation zur Verfügung steht.

Vor Ort machen die Freiwilligen eine Bestandsaufnahme der Vegetation, der Bodenbeschaffenheit und des Nahrungsangebots. Außerdem beobachten sie das Verhalten der Berghühner, notieren, welche anderen Vögel sich in der Nähe aufhalten, und erheben Daten über den Einfluss des Menschen auf die Vegetation im Umkreis der Nester. »Es war eine enorme Herausforderung«, berichtet Jenny Cox, »aber auch unglaublich bereichernd. Ich war vorher nie in Afrika und hatte auch keine Erfahrung in wissenschaftlicher Forschung, deshalb musste ich zunächst viel lernen. In nur zwei Wochen habe ich mir eine Fülle neuer Fertigkeiten ange- ▷



eignet – von der statistischen Erfassung von Vogelnahrung bis hin zu einem geschärften Blick für die Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf den Lebensraum der Berghühner.«

Die peruanische Stadt Cuzco ist berühmt als Hauptstadt des einstigen Inkareichs. Doch zuvor gab es in der Region bereits eine andere Kultur: Von 540 bis 900 n. Chr. herrschten hier die Wari. Zeugnisse ihrer Zivilisation finden sich unter anderem in Cotocotuyoc, in der Nähe von Cuzco. Dort führt die US-Archäologin Mary Glowacki viermal im Jahr mit jeweils bis zu zwölf Earthwatch-Freiwilligen eine zweiwöchige Grabungskampagne durch. Das Graben selbst ist in der dünnen Höhenluft sehr anstrengend und bleibt deshalb einheimischen Hilfskräften überlassen. Die Freiwilligen kümmern sich dagegen in wechselnden Schichten darum, die Funde zu sortieren und zu dokumentieren sowie die Fundorte kartografisch zu erfassen. Glowacki will mit ihren Forschungen herausfinden, warum die hoch entwickelte Kultur der Wari vor rund 1100 Jahren zusammenbrach.

Ihre Helfer sind dabei relativ komfortabel untergebracht. Während bei den meisten anderen Projekten Zelte, Höhlen oder Schiffe als Quartier dienen, logieren sie in einem Hotel in Cuzco und speisen in den Restaurants der Stadt. Ein Tagesausflug zu den berühmten Inkaruinen von Machu Picchu steht auch auf dem Programm.

Die Toftevaag ist ein fast hundert Jahre alter norwegischer Zweimaster, der ursprünglich zum Heringsfang im Nordatlantik diente. Vor 15 Jahren wurde der Kahn restauriert und als Forschungsschiff ausgerüstet. Heute dient er einer Gruppe von drei bis vier Wissenschaftlern und fünf bis sieben Freiwilligen zehnmal im Jahr jeweils zwölf Tage lang als Unterkunft und Forschungsstation. Unter Leitung von Ana Cañadas von der Universität Madrid und Ricardo Sagarminaga van Buiten von der spanischen Umweltorganisation Alnitak beobachtet das Team Meeressäuger vor der spanischen Mittelmeerküste.



Auf Madagaskar gilt ein Earthwatch-Projekt dem Schutz der Lemuren und der Bewahrung ihres Lebensraums.

Leben im Takt der Schiffsglocke

Diese Gewässer gelten als wichtige Schutzregion für die zwölf verschiedenen Wal-Arten des Mittelmeers, darunter der gewöhnliche Delfin, dessen Bestand in den vergangenen Jahrzehnten stark zurückgegangen ist. Deshalb fördern außer Earthwatch auch die Europäische Kommission sowie nationale und regionale Behörden Spaniens dieses von Alnitak initiierte Projekt.

Bei Sonnenaufgang sticht die Toftevaag in See, und die Freiwilligen wechseln sich im Stundentakt, den die Schiffsglocke angibt, bei verschiedenen Aufgaben ab. Dazu gehören die Positionsbestimmung, die Entnahme und Untersuchung von Meerwasserproben, das Abhören des Hydrophons (Unterwasserhorchgeräts), das Ablesen des Echolots und das Spähen nach Meeressäugern. Wenn das Team eine Delfingruppe entdeckt hat und über einen längeren Zeitraum begleitet, schnappt sich jeder der erfahrenen Wissenschaftler jeweils zwei Freiwillige und weist sie in die Beobachtungsmethoden ein. In der Regel werden Schall-, Video- und fotografische Aufnahmen gemacht sowie die Verhaltensweisen der Tiere notiert.

Falls Wind und Seegang so zunehmen, dass die Wellen und Schaumkronen die Beobachtung unmöglich machen, wird die Forschungsfahrt zum Segeltörn. Unter Anweisung Sagarminagas zieht das Team die Segel auf und gelangt auf ebenso abenteuerliche wie umweltfreundliche Weise zum Hafen zurück. Dort heißt es dann, bei der Auswertung der Daten zu helfen. Gelegentlich bleibt aber auch etwas Zeit, das Landleben zu erkunden.

Neben der Organisation und den Freiwilligen sind die Wissenschaftler, welche die Projekte planen und leiten, die unverzichtbaren Dritten im Bunde. Für sie funktioniert Earthwatch im Prinzip genauso wie andere Institutionen zur Forschungsförderung. Sie stellen einen Förderantrag, der von Gutachtern beurteilt wird. Bei positivem Bescheid werden jeweils für ein Jahr Earthwatch-Gelder und -Helfer bewilligt. Je nach Art des Projekts können während dieses Zeitraums bis zu einem Dutzend Freiwilligenteams ausrücken oder auch nur drei bis vier. Wenn die Forschungsergebnisse und die Bewertung durch die Teilnehmer zufrieden stellend ausfallen, ist die Verlängerung für ein zweites und drittes Jahr reine Formsache. Danach müssen die Wissenschaftler in einem neuen Antrag begründen, warum das Projekt fortgesetzt werden sollte.

Viele der von Earthwatch geförderten Untersuchungen erweisen sich tatsächlich als äußerst langlebig. Jedes dritte Projekt im aktuellen Katalog ist schon seit mindestens fünf Jahren dabei, jedes siebte seit über zehn Jahren. »Earthwatch ist eine der wenigen Organisationen, die langfristige Forschung unterstützen, was unerlässlich ist, wenn man Umweltveränderungen gründlich verstehen will«, sagt Alan Birkett, der ein Vorhaben über die Nashörner Kenias leitet.

Weitere Informationen zu allen Projekten sowie zu Finanzierungsmöglichkeiten gibt es im Internet unter www.earthwatch.org/europe oder von Earthwatch Europe, 267 Banbury Road, Oxford OX2 7HT, Großbritannien. Den jährlich erscheinenden Katalog kann man sich kostenlos zuschicken lassen. Während die meisten Afrika-Expeditionen lange im Voraus ausgebucht sind (für die Beobachtung von Geparden in Namibia gibt es bereits eine lange Warteliste!), sind bei etlichen anderen Projekten im nächsten Jahr noch Plätze frei. ◁

AUTOR



Michael Groß ist promovierter Biochemiker, freier Wissenschaftsjournalist und »Science Writer in Residence« am Birkbeck College in London. Er hat im Sommer 2003 an einem vormals von Earthwatch geförderten paläoanthropologischen Ausgrabungsprojekt in Südspanien teilgenommen.

Künstliche Netzhaut für Mensch und Roboter

Elektronikmodule nach dem Vorbild von neuronalen Verschaltungen sollen eine geschädigte Netzhaut ersetzen oder auch Robotern dienen. Größe und Energiebedarf dieser »neuromorpen Chips« nähern sich immer mehr denen natürlicher Systeme.

Von Kwabena Boahen

Rohe Rechenleistung war im Spiel, als Deep Blue im Mai 1997 den Schachweltmeister Garri Kasparow »entthronte«. Der Supercomputer von IBM vermochte bei dem New Yorker Match pro Sekunde um die 200 Millionen potenzielle Züge in Erwägung zu ziehen. Beim Menschen sind es höchstens drei.

Trotzdem stellen Computer für unser Gehirn bisher keine ernsthafte Konkurrenz dar – nicht auf Gebieten wie Sehen, Hören, Mustererkennung oder Lernen. Sie können zum Beispiel einen Menschen von Weitem nicht einfach am Gang erkennen. Ganz schlecht schneiden sie bei einem Effizienzvergleich ab. Ein typischer Supercomputer füllt ein Zimmer. Er wiegt tausendmal so viel wie das menschliche Gehirn und verbraucht millionenfach mehr Energie.

Zugegeben, die einzelnen Hirnzellen arbeiten im Vergleich geradezu einschläfernd langsam. Von einem Neuron zum nächsten benötigt ein chemisch übermitteltes Signal relativ lange: in etwa eine tausendstel Sekunde. Wie ist es da möglich, dass unser Gehirn viele Aufgaben dennoch schneller und effizienter ausführt als die leistungsfähigsten Digitalrechner? Offenbar bringt es das über seine Organisation zu Stande.

Wenn im Gehirn eine Synapse aktiviert wird (eine Kontaktstelle zur Signalübermittlung zwischen Neuronen), entspricht das ungefähr der Ausführung einer elementaren Instruktion im Computer – nur dass im Computer der Anstoß zu solcher Aktivität von einem Programm kommt. Hier zeigt sich ein immenser Unterschied zum Rechner: Das Gehirn schafft pro Sekunde 10^{16} Synapsenaktivierungen (10 Billiarden). Für die gleiche Leistung bräuchte man eine Million Pentium-Computer – und einige hundert Megawatt Strom.

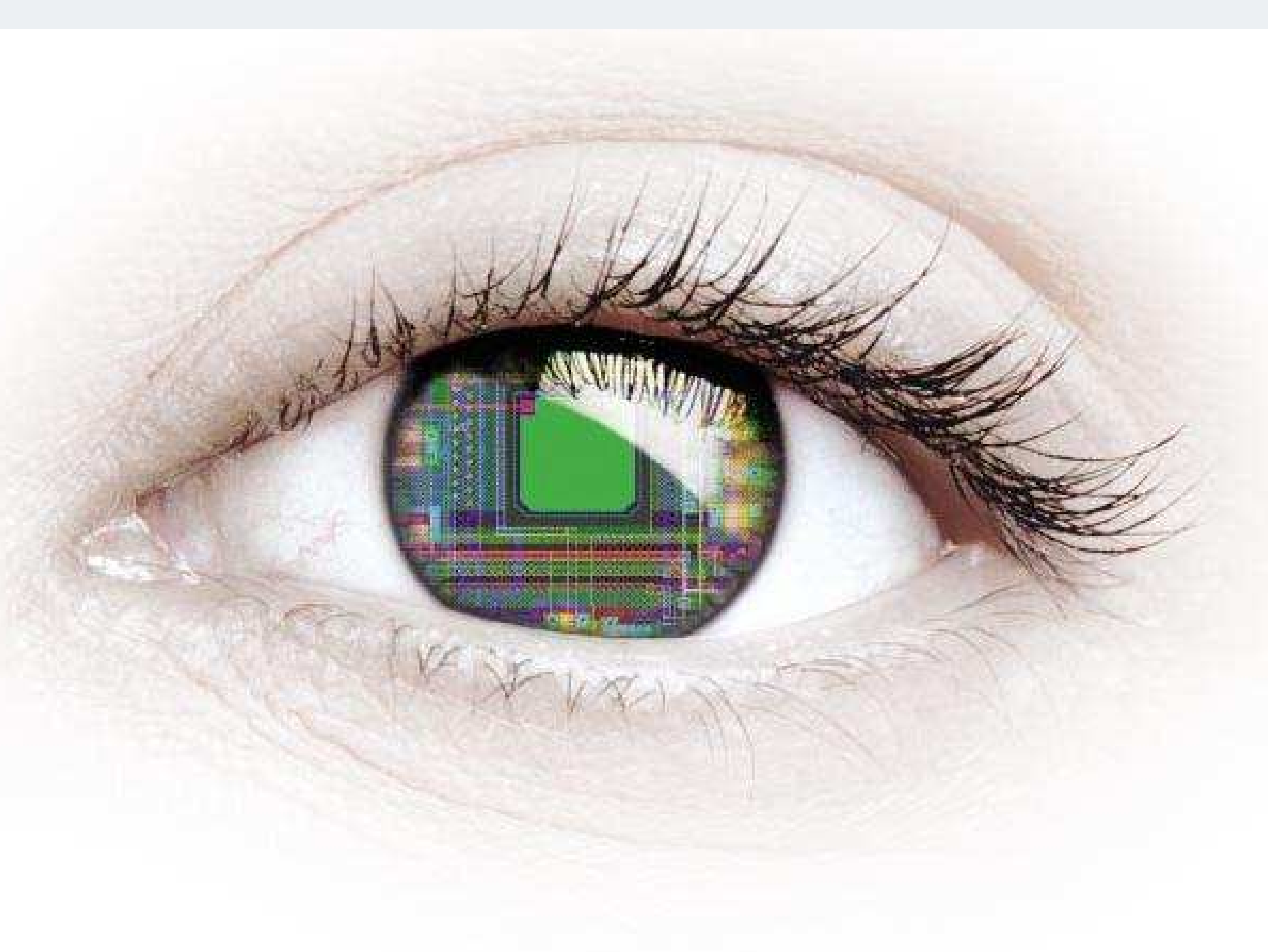
Eine kleine Fraktion von Ingenieuren aus verschiedenen Ländern versucht die überlegene Organisation und Funktionsweise von neuronalen Systemen zu kopieren, besser gesagt technisch nachzuempfinden. Wir nennen das Umsetzen der Naturprinzipien in die technische Gestalt »Morphing« (abweichend vom deutschen Sprachgebrauch): Die Muster neuronaler Verbindungen morphen wir zu Siliziumschaltkreisen, das heißt, wir erstellen neuromorphe Mikrochips. Zu den Zielen dieser Forschung gehört die ins Auge implantierbare Kunstnetzhaut für Blinde auf Basis solcher Chips, die dreißig Jahre lang mit einer einzigen 9-Volt-Batterie funktionieren würde, ebenso wie der Schallprozessor für Gehörlose auf ähnlicher Grundlage. Desgleichen könnten sich preisgünstige und zugleich hocheffiziente neuromorphe Chips eignen, um Roboter oder sonstige intelligente Maschinen mit visuellen, auditorischen und Geruchserkennungssystemen auszustatten.

In meinem Team an der Universität von Pennsylvania in Philadelphia stand zunächst die Netzhaut im Mittelpunkt, schon deswegen, weil Aufbau und Funktionsprinzip der natürlichen Struktur recht gut untersucht und verstanden sind. Inzwischen beschäftigen wir uns auch mit ihrer Beziehung zu anderen Abschnitten – höheren Verrechnungsebenen – des visuellen Systems. Insbesondere möchten wir verstehen und nachbil-

IN KÜRZE

- **Trotz immenser Rechenkapazität** reichen heutige Computer selbst an die Leistungen von Kleinkindern bei Weitem nicht heran, was etwa Mustererkennung oder visuelle Verarbeitung betrifft. Das menschliche Gehirn ist dabei energetisch millionenfach effizienter und platzsparender angelegt.
- So genannte **neuromorphe Mikrochips** – der Natur nachempfunden – arbeiten wesentlich ökonomischer als Module herkömmlicher Rechner. Nach diesem Prinzip könnte sich für manche Formen von Erblindung eine voll implantierbare künstliche Netzhaut entwickeln lassen. Die neuromorphen Chips dürften auch zu besseren elektronischen Sensoren verhelfen.
- **Vielleicht gelingt es mit solchen Chips** eines Tages sogar, dass sich Nervenzellkontakte ähnlich wie im visuellen System selbst finden.

AUGE: STONE; RETINA-CHIP: KAREEM ZAGHLOUL; FOTOILLUSTRATION: JEN CHRISTIANSEN



den, wie sich die natürlichen Verschaltungen auf den Ebenen des Sehsystems ausformen, also nach welchen Kriterien das Gehirn sie in der individuellen Entwicklung herstellt. Die Nachbildung dieser Prozesse nennen wir Metamorphing.

Die etwa einen halben Millimeter starke natürliche Netzhaut – die Retina – stellt im Prinzip eine Gehirnausstülpung dar. Mit mehreren spezialisierten Zellschichten – eine davon die Sehzellen – bildet sie die innerste Auskleidung des hinteren Augapfels (siehe Kasten S. 92/93 links). Die Zellen der Netzhaut bearbeiten die auftreffenden Bilder bereits vor, das heißt sie entlasten das Gehirn, indem sie schon elementare Informationen gewinnen, die dann über den Sehnerv ins Gehirn geschickt werden. Bei dieser Vorverarbeitung leistet jede Zellschicht ihren besonderen Beitrag.

Die äußerste – tatsächlich der Wand des Augapfels zugekehrte – Schicht der Netzhaut sind die Sehzellen oder Fotorezeptoren. Die innerste Schicht besteht aus den retinalen Ganglienzellen, deren lange Ausläufer, die so genannten Axone, den Sehnerv bilden. Die fast eine Million Ganglienzellen der Netzhaut kommen in verschiedenen Typen vor. Ihnen fällt die Aufgabe zu, die vorverarbeiteten visuellen Signale aufzunehmen und ans Gehirn weiterzugeben. Sie erfassen Gruppen von jeweils einer Hand voll bis zu mehreren Hundert Sehzellen. Jede Gruppe an Sehzellen ist dabei für einen kleinen Ausschnitt des Gesichtsfelds zuständig.

Wann immer sich ein Reizmerkmal – etwa die Helligkeit – in einem Sektor verändert, melden die Ganglienzellen das dem Gehirn über den Sehnerv vermittels Pulsen elektrischer Aktivität. Dabei »feuert«, wie es im Laborjargon heißt, jede Zelle proportional zur relativen zeitlichen oder räumlichen Veränderung der Lichtintensität – aber nicht etwa im Verhältnis zur absoluten Reizstärke! Vielmehr nimmt die neuronale Empfindlichkeit mit zunehmender Lichtintensität deutlich ab. Denn unser Auge muss im hellen Mittagslicht ebenso zuverlässig funktionieren wie in der Dämmerung. Die Himmelshelligkeit ändert sich dazwischen um das Zehntausendfache.

▲ Netzhautprothesen machen nur den Anfang. Auch die Sehrinde versuchen Neurobioniker schon mit neuromorphen Chips nachzubauen.

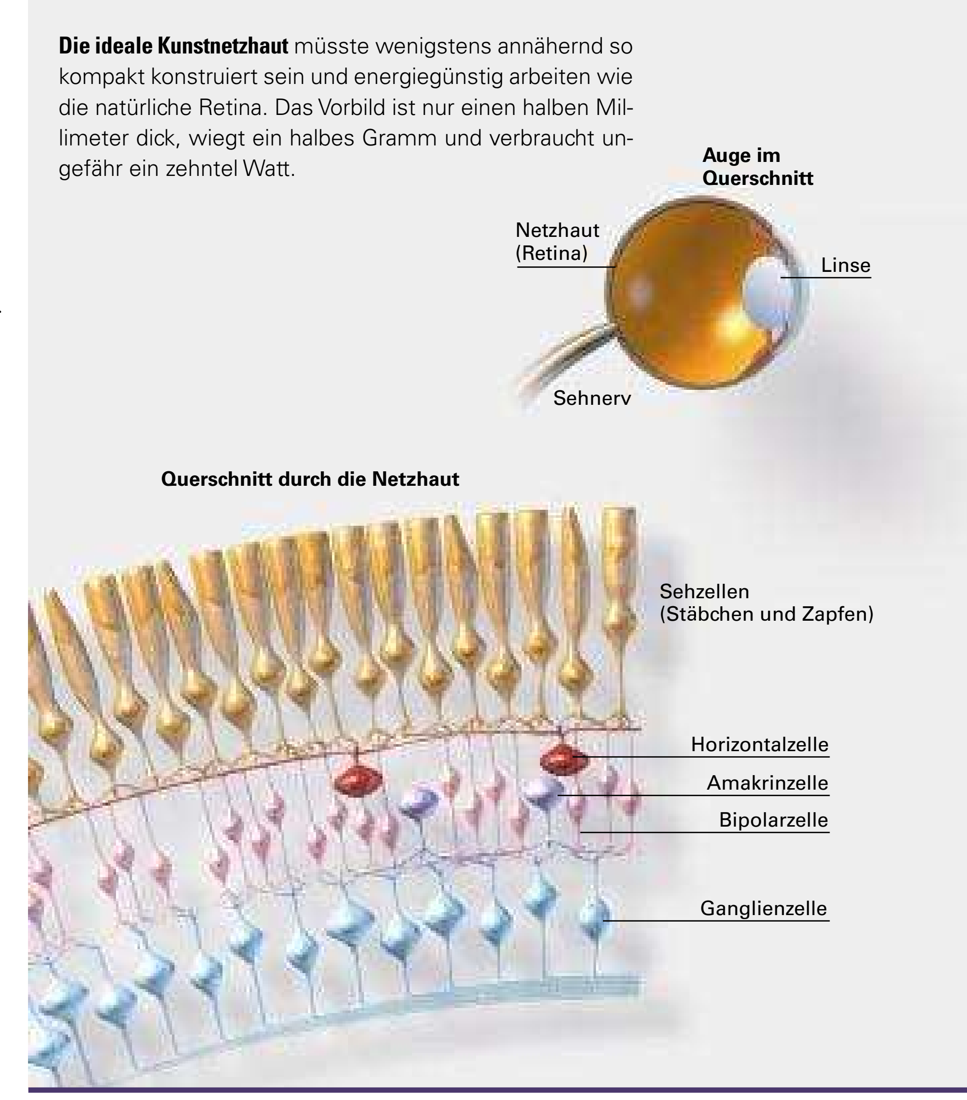
Als Ersten gelang es der Biologin Misha A. Mahowald und dem Mikroelek- ▷

▷ troniker Carver Mead am California Institute of Technology in Pasadena, die ersten drei Zellschichten der Netzhaut (von den Sehzellen an gezählt) elektronisch nachzubilden (siehe SdW 7/1991, S. 64). Andere Wissenschaftler vermochten dann weitere Abschnitte des visuellen Systems beziehungsweise Teile des Hörsystems zu morphen. Nicht wenige von ihnen, ich inbegriffen, hatten in Meads Labor Erfahrung gesammelt.

Im Jahr 2001 gelang es meinem Doktoranden Kareem Zaghloul, alle fünf Schichten der Netzhaut in einem Chip abzuformen. Das ermöglichte, die Signale zu simulieren, die der Sehnerv verschickt. Zaghlouls Chip namens »Visio1« erzeugt Antworten der vier Haupttypen der retinalen Ganglienzellen (siehe Kasten rechts, Mitte und rechts), deren Ausläufer 90 Prozent des Sehnervs bilden.

»Visio1«: Netzhaut als Vorbild für Chip zum Sehen

Die ideale Kunstnetzhaut müsste wenigstens annähernd so kompakt konstruiert sein und energiegünstig arbeiten wie die natürliche Retina. Das Vorbild ist nur einen halben Millimeter dick, wiegt ein halbes Gramm und verbraucht ungefähr ein zehntel Watt.



Der Natur nachgemacht: winziges Signal – großer Effekt

In dem Chip entspricht der elektrischen Aktivität eines jeden Neurons eine einzelne elektrische Spannung. Durch Spannungsunterschiede fließt Strom zwischen verschiedenen Punkten des Schaltkreises und wird unterwegs durch Transistoren beeinflusst. Dies entspricht der Modulation eines Nervensignals an Synapsen. Licht, das auf einen Fotosensor trifft, verändert an dieser Stelle des Schaltkreises die Spannung, ebenso wie sich die neuronale Aktivität einer Sehzelle durch Lichteinfall verändert. Um das Verhalten aller fünf Netzhautschichten zu reproduzieren, setzte Zaghloul zahlreiche Exemplare dieses Schaltkreises nebeneinander.

Eine retinale Ganglienzelle macht – wie jede Nervenzelle – aus einem kleinen Eingangs- ein großes Ausgangssignal, das charakteristische »Aktionspotenzial«, dadurch, dass sie der Energie des Eingangssignals ein Vielfaches an gespeicherter Energie hinzufügt. Diesen Verstärkungseffekt erzielt Zaghloul, indem er das Ausgangssignal eines Transistors wieder auf diesen selbst zurücklenkt. Dadurch steigt die Spannung am Transistor sehr rasch bis auf einen Maximalwert, was dann in einem kurzen, heftigen Spannungsimpuls resultiert.

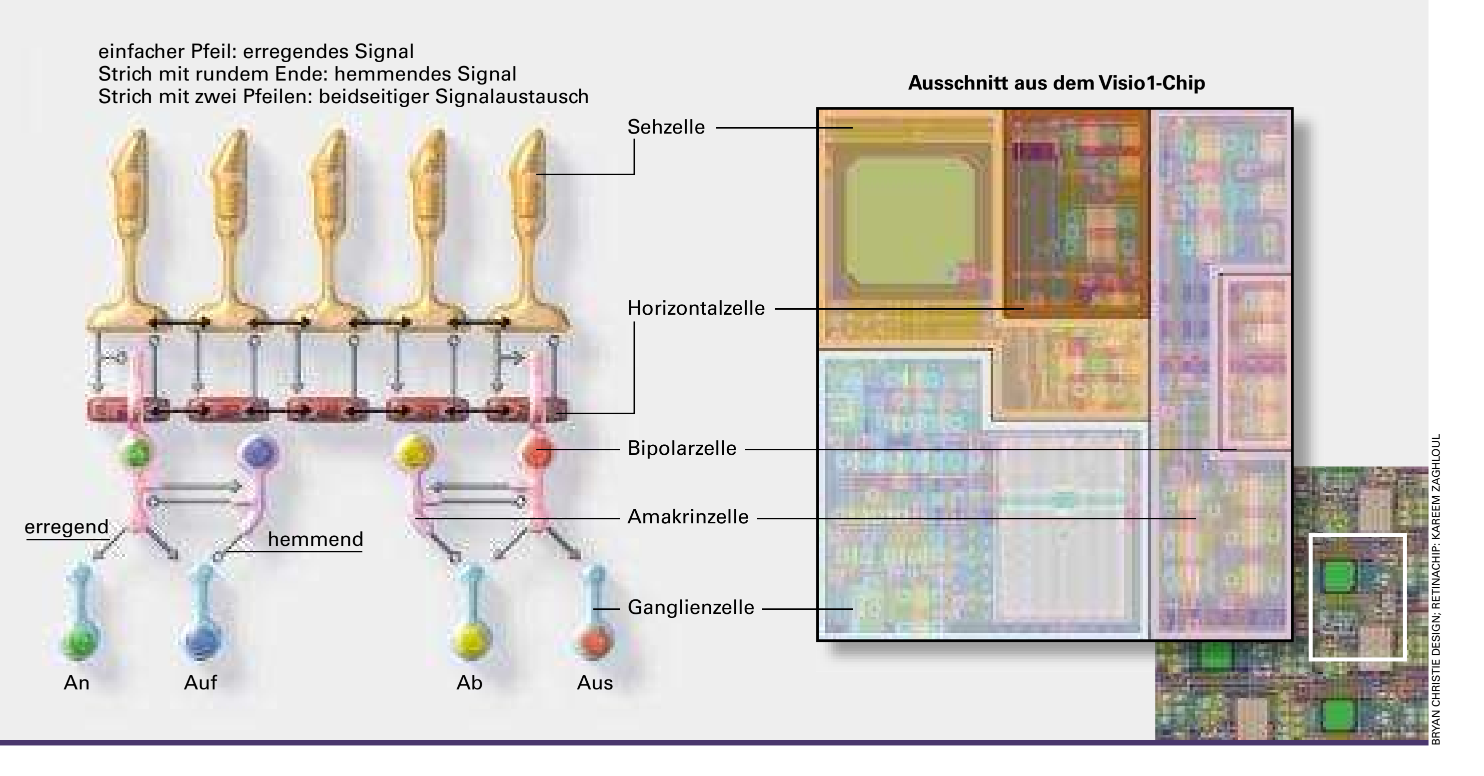
Visio1 benötigt nur 60 Milliwatt, das Tausendstel eines PC. Der Chip könnte somit tatsächlich den Weg für eine komplette Inneraugenprothese mitsamt Kamera, Prozessor und Stimulator ebnen. Verschiedene Forschergruppen arbeiten an künstlichen Implantaten, die denjenigen Erblindeten eines Tages wieder zum Sehen verhelfen könnten, bei denen die Sehzellen geschädigt, die retinalen Ganglienzellen und der Sehnerv aber intakt geblieben sind. Bei Prothesen, wie sie derzeit unter anderem an der University of Southern California in Los Angeles entwickelt werden, benötigt der Patient noch eine Brille mit einer Kamera und einen kleinen tragbaren Computer. Implantierte Mikroelektroden stimulieren die retinalen Ganglienzellen. Der Patient sieht verteilte Leuchtpunkte, und auch das nur in einem so kleinen Ausschnitt des normalen Gesichtsfelds (weniger als 10 mal 10 Bildpunkte), dass er stets den Kopf bewegen und so die Welt Stück für Stück abfahren muss, um den Tunnelblick etwas zu weiten.

Betroffene hätten es bequemer, wäre das Auge selbst wieder die Kamera. Der Chip Visio1 mit seinen 3600 Ganglienzell-Ausgängen sollte ein fast normales Sehen ermöglichen. Bevor eine Prothese für naturnahes Sehen Wirklichkeit wird, ist allerdings die biologische Verträglichkeit der Hüllmaterialien und Reizschnittstellen noch zu verbessern. Das visieren die Experten etwa für das Jahr 2010 an. Ebenso herrscht weiterer Klärungsbedarf bezüglich der Rolle der einzelnen Zelltypen der Netzhaut, ihrer speziellen Reaktionen und ihres Beitrags zur visuellen Empfindung. Vorher schon könnten die neuromorphen Netzhautchips als Sensoren etwa für Roboter, Überwachungs- und andere Automatisierungssysteme Verwendung finden.

Im Vergleich zu anderen elektronischen Sehhilfen bringt unser neuromor-

Das Vorbild
Die Netzhaut leistet mit ihren diversen Zelltypen eine Vorverarbeitung von Bildern. Das Ergebnis, das die Ganglienzellen ins Gehirn schicken, entsteht mittels komplexer Verschaltungsmuster. 90 Prozent der Sehnervfasern sind Fortsätze der vier gezeigten Gangienzelltypen. »An«-Zellen feuern, wenn eine Stelle heller ist als die Umgebung, »Aus«-Zellen, wenn sie dunkler ist; »Auf«-Zellen werden aktiviert, wenn die Helligkeit steigt, »Ab«-Zellen, wenn sie sinkt.

Der nachempfundene Chip
Bei dem Retinachip ahmen Schaltkreise die komplexen Wechselbeziehungen zwischen den Netzhautzellen nach. Feine Drähte kopieren die Zellausläufer, Transistoren die Synapsen (Kontakte zwischen Zellen). Je nach Zusammenstellung entstehen erregende oder hemmende Impulse. Die Funktionen der einzelnen Netzhautzellschichten wurden auf getrennte Flächen des Chips aufgebracht. Die großen grünen Flecken sind Fototransistoren, die Licht in Elektrizität umwandeln.



pher Netzhautchip so viel Energieeinsparung, dass mich nun interessierte, wie das Gehirn wohl seine hohe Effizienz erzielt. Mead hatte schon zwei Jahrzehnte zuvor offenbar zu Recht vorhergesagt, dass gewöhnliche Computer trotz der enormen Fortschritte niemals so effektiv arbeiten würden wie das Gehirn. Doch ließe sich dieses Ziel irgendwie anders erreichen? Die Lösung kam mir vor acht Jahren in den Sinn.

Bei der Hardware angesetzt

Ich machte mir klar, dass die Effizienz davon abhängt, wie gut bereits die Hardware – also praktisch die Bauteile – zur Aufgabe passt, das heißt dafür maßgeschneidert ist. Bei normalen Computern ist eine nachträgliche Feinjustierung der Hardware nicht möglich. Dafür verwendet man stattdessen die Software, die aufgespielten Programme. Die heutigen Rechner bieten einige wenige Allzweckbauteile. Die Software gibt dann lediglich vor, in welcher Reihenfolge diese Werkzeuge benutzt werden sollen.

Das Gehirn – und auch neuromorphe Chips – funktionieren anders. Bei ihnen passt sich die Hardware an die Aufgabe an. Das bedeutet, das Werkzeug selbst verändert sich gemäß den Anforderungen: Die Programmierung erfolgt auf der Ebene der einzelnen Verbindungen zwischen den Bausteinen. Nur – wie macht das Gehirn das? Wie richtet es individuelle Kontakte zwischen Nervenzellen ein?

Könnten wir den Mechanismus, den die Neuronen benutzen, in Siliziumstrukturen umsetzen – wir sagen dazu »metamorphen« –, bekämen wir neuromorphe Chips, die sich nach dem gleichen Prinzip selbst modifizieren würden. Dann müssten wir die Gehirnschaltkreise nicht mehr mühsam detailgenau nachbauen. Ich begann nachzuforschen, was man diesbezüglich über die neuronalen Entwicklungsprozesse weiß. Hiervon versprach ich mir Aufschluss darüber, wie der Organismus sein Rüstzeug, seine Hardware, passgenau herstellt – sprich, wie das Gehirn eben die Verbindungen aufbaut, die es benötigt.

Es verschlägt einem den Atem, wenn man bedenkt, wie das Neuronennetzwerk eines menschlichen Gehirns mit seinen grob geschätzt 10^{12} Nervenzellen und 10^{16} Synapsen wohl entsteht. Zwar weist die menschliche DNA das Äquivalent an Information von einer Milliarde (10^{9}) Bits auf. Jedoch würde das keinesfalls ausreichen, um Position und Kontakte so vieler Neuronen im Detail zu ▷

▷ kodieren. Mag die genetische Information die frühen Entwicklungsschritte noch weit gehend lenken, so dominieren später andere Einflüsse: nämlich solche von Interaktionen der Neuronen untereinander und von Eindrücken der Außenwelt. So genannte sensorische Neuronen – die Sinneseindrücke verarbeiten – verdrahten sich in Reaktion auf den sensorischen Input. Als grobe Faustregel kann dabei gelten: Nervenzellen, die zugleich feuern, verdrahten sich. Das bedeutet, dass ein Neuron von allen ankommenden Signalen diejenigen akzeptiert, die es regelmäßig dann erhält, wenn es selbst auch gerade aktiv ist – die also von zeitgleich aktiven Zellen stammen. Der große Rest der eintreffenden Signale wird ignoriert.

Wie verdrahten sich dann verschiedene neuronale Ebenen, etwa im Sehsystem die Axone des Sehnervs, weiter im Gehirn? Am Froschgehirn haben Neurowissenschaftler eingehend untersucht, was mit der Information von der Netzhaut weiter geschieht (siehe SdW 11/1999, S. 56). Bei diesen Tieren bildet das Tectum opticum im Mittelhirn eine der Endstationen des Sehnervs und eine wichtige Verarbeitungsstation der visuellen Information. Die im Auge verrechneten Netzhautbilder werden auf das Tectum topografisch projiziert: Die Information benachbarter Punkte auf der Netzhaut erscheint auch auf dieser Station nahe beieinander.

Wie sich herausstellte, erfolgt die Verknüpfung in zwei Schritten. Ein neu entstandenes Neuron (also auch eine zukünftige retinale Ganglienzelle) bildet viele Ausläufer, wovon sich der längste zum Sendedraht – dem Axon – entwickelt. Die anderen werden zu Empfangsleitungen – den oft baumartig verzweigten Dendriten. (Die retinalen Ganglienzellen empfangen über ihre Dendriten Signale von anderen Netzhautneuronen.) Das Axon streckt sich immer länger, geleitet von einem so genannten Wachstumskegel an seiner Spitze, der sich amöbenartig weiter und weiter schiebt. Diese Struktur erkennt chemische Konzentrationsgefälle, die den Ausläufer gewissermaßen zur richtigen Straße der Stadt aus Tectumzellen geleiten.

Auf einer Duftspur zum gemeinsamen Ziel

Das richtige Haus – die passende Zelle im Mittelhirn, zu der auch die Ausläufer der retinalen Nachbarn Kontakt aufnehmen – findet das Axon in einem zweiten Schritt. Ganz genau verstehen die Forscher diesen Prozess noch nicht. Sie wissen aber, dass benachbarte retinale Ganglienzellen dazu neigen, gleichzeitig zu feuern. Ich überlegte, ob die Axone einer benachbarten Gruppe von retinalen Ganglienzellen auf Duftspuren ansprechen, die von denselben zu dem Zeitpunkt gerade aktiven Tectumneuronen freigesetzt werden. Die Axone benachbarter Ganglienzellen würden sich demnach an derselben chemischen Duftspur orientieren. Wenn ein solches Axon dann bis zu dem Dendritenbaum vorgestoßen ist, der die Spur gelegt hat, stellt es den Kontakt her – denn Ganglien- und Tectumzelle sind ja gleichzeitig erregt.

Nach diesem Modell entwickelte mein Doktorand Brian Taba 2001 einen Chip, »Neurotrope1« genannt, der diesen Prozess im Tectum simuliert und mit Zaghlouls Netzhautchip verknüpft wird (siehe Kasten rechts). Dabei machte er aus der Not einer technischen Beschränkung eine Tugend: Visio1 enthält zwar 3600 »Ganglienzellen«, aber weitaus weniger elektrische Ausgänge. Es gibt also nicht zu jeder Ganglienzelle einen eigenen Draht; vielmehr gibt Visio1 jedes Mal, wenn eine Ganglienzelle feuert, deren Nummer (»Adresse«) in Form von 13 Bits aus. Der Empfängerchip Neurotrope1 dekodiert die Adresse und erzeugt an der richtigen Stelle im Siliziummosaik wieder einen Impuls. Mit diesem Trick erhalten wir zwischen den korrespondierenden Koordinaten beider Chips ein Bündel virtueller Axone – einen künstlichen Sehnerv. Indem Taba zwischen Sender und Empfänger eine Art »Adressbuch« schaltet, das zu jeder vom Sender eingehenden eine – nicht notwendig identische – Ausgangsadresse liefert, kann er de facto jede Faser seines künstlichen Sehnervs an einen anderen Ort umlenken.

Die Umverdrahtung, die im natürlichen Vorbild durch chemische Gradienten gesteuert wird, realisiert Taba durch Schaltkreise, die auf elektrische Gradienten ansprechen und zwischen den im Bienenwabenmuster angeordneten Neuronen des künstlichen Tectums sitzen. Die Siliziumneuronen laden, wenn sie aktiv sind, ihre Gitterumgebung elektrisch auf. Wie in einem Transistor diffundiert die Ladung dann durch das künstliche neuronale Gewebe. Der Vorgang simuliert, dass die Tectumzellen Signalstoffe zur Orientierung des Axonwachstums abgeben. Die simulierten Wachstumskegel registrieren die Gradienten der simulierten Signalstoffe und führen ihre virtuellen Axone gradientenaufwärts, der Ladungsquelle entgegen. Eine virtuelle Verdrahtung erfolgt, wenn Ladungsabgabe und Gradientendetektion gleichzeitig stattfinden – das entspricht einer gleichzeitigen Aktivierung von Axon und Zielneuron.

Würden sich unter diesen Voraussetzungen die Enden der virtuellen Axone in einer gewissen Ordnung sortieren – ähnlich wie bei der natürlichen Projektion von Netzhautbereichen auf das Tectum, wobei die Axone benachbarter Zellen nah beieinander enden? Taba begann mit einer Zufallsverdrahtung zwischen Visio1 und Neurotrope1. Dann reizte er jeweils kleine Bereiche der Kunstnetzhaut, und zwar abwechselnd immer wieder einen anderen Flecken – insgesamt mehrere tausend Gebiete. Das brachte benachbarte Gruppen von »Ganglienzellen« dazu, gleichzeitig zu feuern.

Tatsächlich veränderte die fleckweise Aktivierung die virtuelle Verdrahtung

KAREEM ZAGHLOUL

◀ So sieht Visio1, der Netzhautchip von Kareem Zaghloul, Kopfbewegungen seines Erschaffers – ohne hohen Rechenaufwand. Die vier Typen retinaler Ganglienzellen erkennen dunkel (rot), hell (grün) sowie Vorder- und Hinterkanten einer bewegten Struktur (gelb und blau). Ähnlich wie in den rechten Bildern würde ein Blinder mit Netzhautimplantat das Gesicht sehen.

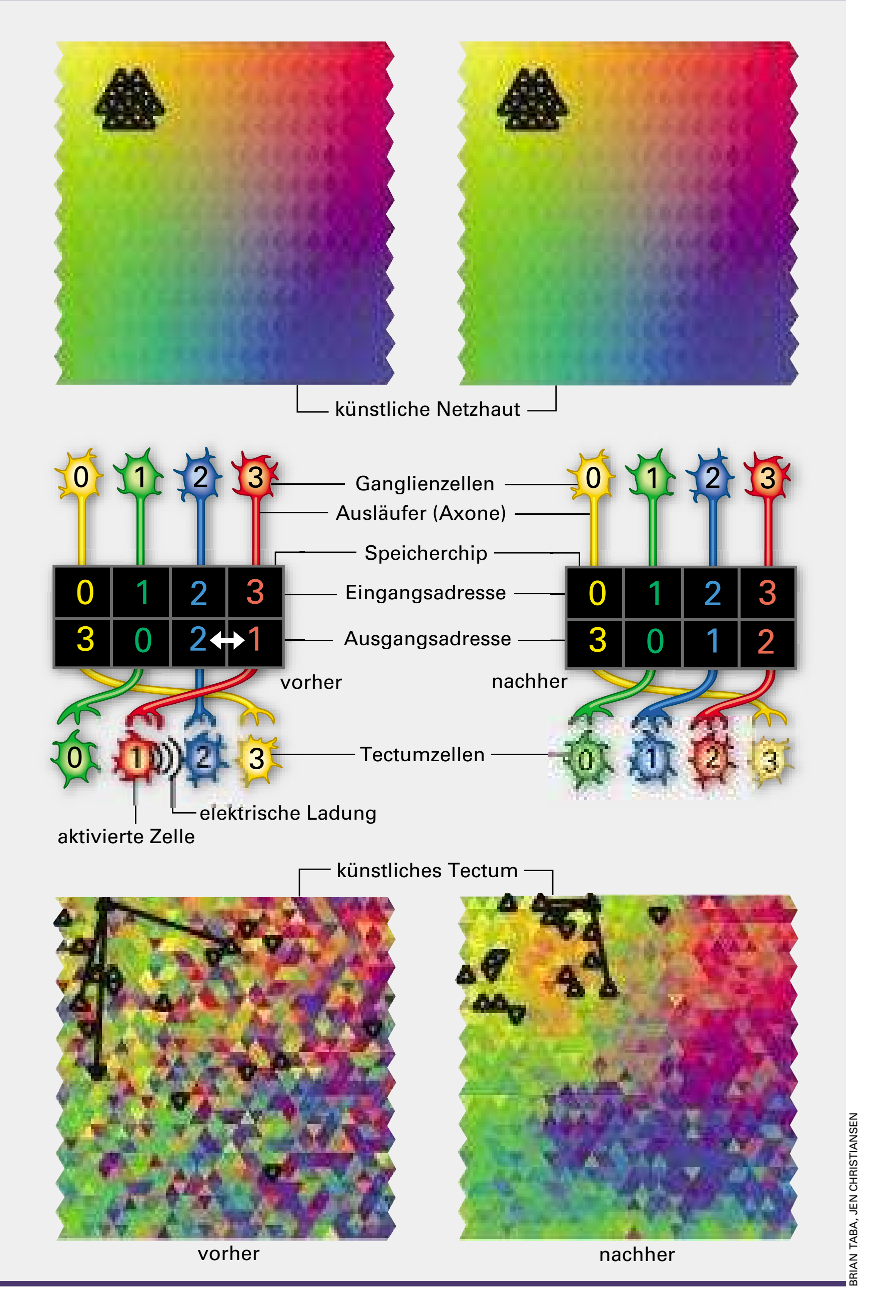
»Neurotrope1«: Kontakte knüpfen wie im Froschgehirn

Früh in der Augenentwicklung des Frosches entsenden die retinalen Ganglienzellen Ausläufer ins Tectum opticum im Mittelhirn. Die Ausläufer folgen chemischen Spuren, die von gleichzeitig aktiven Tectumzellen stammen. Mit denen knüpfen sie Kontakt. Im Mittelhirn entsteht eine Art Landkarte, welche die Lagebeziehungen von Punkten auf der Netzhaut spiegelt.

Wie sich diese topografische Karte selbst organisiert, simulierte das Team des Autors: Der Netzhautchip »Visio1« (Bilder oben) und ein neuromorpher Chip (»Neurotrope1«) vom Tectum opticum (Bilder unten) wurden durch eine Zwischenstation, einen Speicherchip, verknüpft (Bilder Mitte). Der Netzhautchip schickt für jeden Impuls dessen Ortsinformation (»Adresse«) an die Zwischenstation. Diese ersetzt die bei ihr eingehende Adresse zunächst durch eine Zufallsadresse und sendet diese an den Tectumchip. Das entspricht einem Sehnerv, dessen Fasern an zufälligen Stellen des Tectums enden.

Der Umverdrahtung von Nervenfasern im Tectum entspricht, dass zum Beispiel das künstliche Tectum den Zwischenchip anweist, zwei seiner Ausgänge zu vertauschen, weil elektrische Gradienten im künstlichen Tectum das veranlassen (Bild Mitte).

Die unteren Bilder lassen erkennen, dass sich bei wiederholter Reizung einzelner Stellen des Netzhautchips (Dreiecke in den Bildern oben) tatsächlich die verknüpften Stellen auf dem Tectumchip näher zusammenlagern. Es entsteht quasi eine topografische Karte der Kunstretina.



BRIAN TABA, JEN CHRISTIANSEN

mit dem anderen Chip dramatisch. Die virtuellen Axone benachbarter »Zellen« von Visio1 endeten auf Neurotrope1 nun doppelt so nah beieinander wie vorher (Kasten oben), mit leichten Variationen durch die Zufälligkeit des »Lernprozesses«. Allerdings lagen die virtuellen Kontakte nicht unmittelbar beieinander wie im natürlichen Vorbild. Warum macht es das Gehirn so viel besser?

Um weiterzukommen, wandten wir uns nun der Hirnrinde, dem Cortex, zu. Bei Säugetieren hat das Tectum für die Sinne nur noch eine eher untergeordnete Bedeutung. Vielmehr gelangt der Großteil der visuellen Information von der Netzhaut über eine Schaltstation im Thalamus zur Sehrinde im Hinterkopf. Auch dort finden sich Informationen aus benachbarten Netzhautbereichen desselben Auges nebeneinander. Solche topografischen Karten legt die Hirnrinde in der frühen Kindheit an. Die Informationen aus dem Auge treffen in der so genannten primären Sehrinde ein, der Area V1 (auch Area 17 oder Area striata genannt) – und dort in der Schicht 4. Gründlicher erforscht als dieses Gebiet ist keine Landkarte der knapp drei Millimeter dicken Hirnrinde.

In der primären Sehrinde herrscht hinsichtlich der eintreffenden Signale eine ausgeklügelte Aufgabenteilung. In der Rindenschicht, die solche Eingänge erhält, spezialisieren sich die Zellen jeweils auf bestimmte Merkmale eines Objekts, das vor dem Auge erscheint. In dieser Weise werden nicht nur dessen Breite oder Länge einzeln erfasst, sondern auch die Ausrichtung der Kanten wird abgebildet. Jede der betreffenden Zellen reagiert bei einem bestimmten Winkel: die eine etwa auf eine waagrechte Objektkante, eine andere auf eine senkrechte, wieder andere auf eine Nei- ▷

▷ gung von beispielsweise 45 Grad und so weiter in vielen Nuancen. Ungefähr alle Millimeter wiederholen sich Zellen für dieselbe Orientierungsrichtung, sodass sie das gesamte Bild einfangen.

Für die Entdeckung dieser Karte in der primären Sehrinde, die ihnen in den 1960er Jahren an der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) gelang, erhielten David H. Hubel und Torsten N. Wiesel 1981 den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin. Anhand der Befunde entwarfen die beiden Neurophysiologen ein Verdrahtungsschema für einen künstlichen visuellen Cortex von geradezu abschreckender Komplexität. Es verdeutlicht aber, wie es gelingen könnte, die Wahrnehmung einer gerade oder schräg orientierten Kante durch Zellen der Sehrinde zu ermöglichen.

In dem Modell von Hubel und Wiesel ist jede »Rindenzelle« mit zwei Zellsorten vom Thalamus verdrahtet (der Zwischenstation, welche die Sehnervimpulse auffängt). Die eine dieser beiden Zellgruppen im Thalamus spricht an, gibt also ein Signal an die Rinde weiter, wenn den entsprechenden Netzhautbereich ein dunkler Fleck trifft. Die andere Gruppe reagiert auf Helligkeit. (Übertragen auf unseren Visio1-Chip – der in dem Fall die Rolle des Thalamus übernimmt – entspricht die Reaktion auf Dunkelheit dem Verhalten von dessen »Aus«-Zellen, die Reaktion auf Helligkeit dem der »An«-Zellen.) Die räumliche Anordnung beider Zellfraktionen zueinander im Thalamus entscheidet darüber, auf was genau die einzelnen Zellen der Hirnrinde »achten«. Damit eine Rindenzelle zum Beispiel eine senkrecht orientierte Kante erkennt, müssen beide Sorten auf der Projektionskarte im Thalamus in senkrechten Reihen angeordnet sein, allerdings leicht gegeneinader versetzt, zum Beispiel die Aus-Zellen immer links von den An-Zellen. Eine an genau der richtigen Stelle senkrecht im Blickfeld liegende Objektkante (ein Schwarz-Weiß-Übergang) aktiviert alle Aus- wie auch alle An-Zellen. Dagegen erregt eine waagrechte Kante nur je die Hälfte beider Thalamus-Zellgruppen. Bei einer senkrechten Kante erhält also diese Rindenzelle doppelt so viel Input und reagiert entsprechend lebhafter.

Spontane Fleckenmuster nach Turing

Zunächst entmutigte uns die Detailflut dieses Modells. Um es umzusetzen, hätten wir jede einzelne »Zelle« der imitierten Hirnrinde gemäß der von ihr bevorzugten Orientierung verdrahten müssen. Dann müsste man, um die natürlicherweise fließenden Übergänge der Winkelpräferenz von Zelle zu Zelle zu imitieren, das Verschaltungsmuster systematisch langsam von einer Zelle zur anderen ein wenig verschieben, sodass Nachbarzellen in der Hirnrinde sich ähnlich, aber nicht völlig gleich verhielten. Auch müssten sich sämtliche Orientierungen wie in der echten Hirnrinde jeweils nach einem Millimeter wiederholen, und zwar so, dass aneinander grenzende Orientierungsstreifen der Hirnrinde von benachbarten Streifen der Netzhaut stammen. Tabas Simulation eines Wachstumskegels leistete diese komplexe Anordnung jedenfalls nicht mehr.

Ende des Jahres 2002 entschlossen wir uns, den Kampf mit diesem Modell aufzugeben und uns nach einem neuen Ansatz umzusehen. Auf den brachte uns schließlich ein fünfzig Jahre altes Experiment. Der Mathematiker und geistige Vater des Computers Alan M. Turing hatte Anfang der 1950er Jahre ein Modell entwickelt, nach dem sich aus verrauschten Vorgaben spontan geordnete Muster entwickeln können – ähnlich den Flecken eines Leoparden oder der Fellzeichnung einer Kuh. Unsere Hoffnung war, auf ähnliche Art fleckenweise sortierte Zellen zu erhalten.

Als Turing seine Idee an der Universität Manchester auf einem der ersten elektronischen Computer testete, ließ er die »Hautzellen« zufallsverteilt sowohl »schwarze Pigmente« als auch »Bleiche« ausschütten. Beide Stoffe diffundierten in die Nachbarzellen und beeinflussten nicht nur deren Farbe, sondern auch deren Ausschüttungsverhalten. Winzige Unterschiede der Zellen bei der Produktion von Farbe oder Bleiche – quasi geringe Abweichungen der Genexpression beider Stoffe – entwickelten sich zu Tupfen, Sprenkeln und selbst Streifen, schließlich daraus dann zu großen hellen

Forschergruppen und Ziele der neuromorphen Elektronik

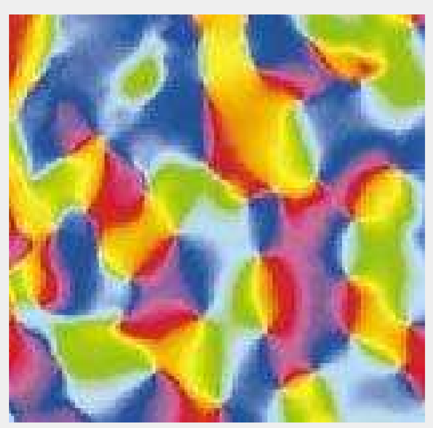
Elektronische Sensoren sollen einmal möglichst genauso effizient arbeiten wie Nervennetze.

Einrichtung	Forscher	Objekt
Johns Hopkins University	Andreas Andreou, Gert Cauwenberghs, Ralph Etienne-Cummings	batteriegetriebenes Spracherkennungssystem; Taktgeber für Gehbewegungen; objekterkennende Kamera
ETH Zürich	Tobi Delbrück, Shi-Chii Liu, Giacomo Indiveri	Siliziumretina und Aufmerksamkeitschip, der automatisch hervorstechende Bereiche in einer visuellen Szene erfasst
Universität Edinburgh	Alan Murray, Alister Hamilton	künstliche Nase und »Riechen« mittels Zeitpulsen
Georgia Institute of Technology	Steve DeWeerth, Paul Hasler	gekoppelte Rhythmusgeneratoren, die Bewegungen eines mehrgliedrigen Roboters koordinieren
HKUST, Hongkong	Bertram Shi	binokulärer Prozessor für räumliche Wahrnehmung und visuelle Bewegungsverfolgung
MIT	Rahul Sarpeshkar	implantierbarer Lautprozessor für Gehörlose
University of Maryland	Timothy Horiuchi	Chip für Echoortung in Anlehnung an Fledermäuse
University of Arizona	Charles Higgins	Bewegungsdetektor entsprechend dem Sehsystem von Fliegen

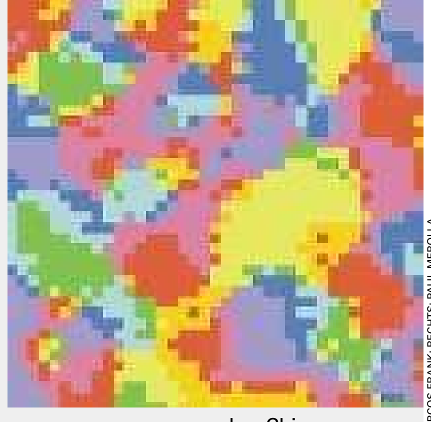
Ein Chip der Sehrinde

Zellgruppen der primären Sehrinde von Säugetieren »erkennen« bewegte Objektkanten. Sie reagieren dabei stets auf eine bevorzugte Winkelrichtung (Farbkode siehe unten). Daraus resultieren Karten – als Beispiel hier im Frettchengehirn. Ganz ähnliche Muster entstehen mit einem neuromorphen Chip (ganz rechts).





Frettchen



neuromorpher Chip

und dunklen Bereichen. Würde das Prinzip auch bei simulierten kortikalen Landkarten funktionieren?

Das wiesen Misha Tsodyks und seine Kollegen vom Weizmann Institute of Science in Rehovot (Israel) vor vier Jahren mit einer Softwaresimulation nach. Mein Doktorand Paul Merolla machte sich daran, den Selbstorganisationsprozess auch in Siliziumbausteinen zu morphen. Halbleiter von Transistoren werden absichtlich mit Fremdatomen versetzt – dotiert –, um Zonen verschiedener Leitfähigkeit zu erzeugen. Dadurch variieren die Rechenelemente geringfügig entsprechend den natürlichen Zellen, die trotz identischer Genausstattung geringfügig verschiedene Mengen an Proteinen produzieren.

Simulierte Karten der Hirnrinde

So baute Merolla ein Siliziumneuron, von dem er viele Versionen zusammenfügte. Um die Diffusion von Pigment und Bleichmittel nachzuahmen, sind in dem Mosaik Nachbarneuronen nach dem Vorbild echter Zellen durch erregende und hemmende Kontakte verbunden. 2003 brachten wir die neuen Chips zum Laufen – und erhielten tatsächlich Aktivitätsflecken, die an die Musterung eines Leoparden erinnern. Je nachdem welche Kantenorientierung wir für ein simuliertes Objekt eingaben, meldeten sich andere Zellgruppen. Mit unterschiedlichen Farben für die einzelnen Gruppen erzielten wir Bilder mit orientierungsspezifischen Flächen, die zu unserer Freude den Karten von der primären Sehrinde sehr junger Frettchen ähneln (Bild oben).

In der primären Sehrinde stellt die Landkartenebene, in der die Information vom Thalamus eingeht, nur eine – die vierte – von sechs Schichten dar. Da es gelungen war, die fünf Schichten der Netzhaut in dem Chip Visio1 zu morphen, möchten wir das irgendwann auch für die sechsschichtige Hirnrinde versuchen. In einem ersten Schritt haben wir die Schicht 4 grob als orientierungsspezifische Karte nachgebaut. Da die Rinde trotz nicht einmal 3 Millimeter Dicke immerhin etwa fünfmal mächtiger ist als die Netzhaut, würden wir pro Fläche wesentlich mehr integrierte Schaltkreise benötigen.

Zwar steigt auch die Leistung von Computern üblicher Machart rapide. Chiphersteller zwängen heute schon eine Million Transistoren und zehn Meter Verbindungsdraht auf einen Quadratmillimeter. Das ist bereits ein Hundertstel dessen, was die Hirnrinde in einem Kubikmillimeter enthält (100 Millionen Synapsen und drei Kilometer Axone), und die Computertechnik schreitet rasant voran: In fünf Jahren sollte der Vorsprung des Gehirns auf den Faktor 10 zusammengeschmolzen sein. Was brächte das aber für die Simulation der Hirnrinde? Bei Standardmethoden würden, um eine Milliarde Transistoren pro Quadratzentimeter zu designen, Tausende von Ingenieuren benötigt.

Schon wenn man die Effizienzsteigerung vergleicht, ist die Natur um Dimensionen überlegen. Es mag viele beeindrucken, dass die Firma Intel 10 000-mal so viele Transistoren wie zuvor mit nur der hundertfachen Anzahl an Fachleuten zu verdrahten wusste. Aber der Mensch besitzt lediglich doppelt so viele Gene wie die Fliege, jedoch zehn Millionen Mal so viele Neuronen. Der Komplexitätssprung gelang der Natur mit ausgefeilteren Entwicklungsstrategien, die nach einem an sich einfachen Prinzip wirken. Wenn wir das nachahmen und uns, statt einfach neuronale Schaltkreise zu morphen – also in Chips zu übersetzen –, die Entwicklungsprozesse im Gehirn genau ansehen und diese nachempfinden, kann die Nanoelektronik der Zukunft für den Umgang mit Komplexität nur gewinnen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Kwabena Boahen ist Professor für Bioengineering an der Universität von Pennsylvania in Philadelphia. Er stammt aus Ghana und ging 1985 zum Studium in die USA, wo er zunächst Elektroingenieurwissenschaft und Informatik studierte, sich aber bald für neuronale Netzwerke interessierte.

Selbst ist das Netz. Von C. W. Eurich und S. Wilke in: Gehirn und Geist 3/2002, S. 90

A recurrent model of orientation maps with simple and complex cells. Von P. Merolla und K. Boahen in: Neural Information Processing Systems, Bd. 16. Von S. Thrun et al. (Hg.), MIT-Press, 2004

Optic nerve signals in a neuromorphic chip. Von K. A. Zaghloul und K. Boahen in: IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Bd. 51, Nr. 4, S. 657, 2004

Topographic map formation by silicon growth cones. Von B. Taba und K. Boahen in: Advances in Neural Information Processing Systems, Bd. 15. Von S. Becker et al. (Hg.), MIT Press, 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

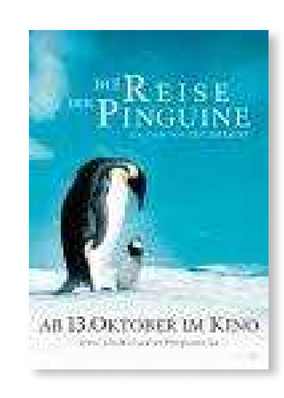
ZOOLOGIE

Luc Jacquet (Drehbuch und Regie), Laurent Chalet und Jérôme Maison (Kamera)

Die Reise der Pinguine

(Le marche de l'empereur)

Kinofilm, 86 Minuten. Start 13. Oktober 2005
Buch zum Film: aus dem Französischen von Cornelia Panzacchi.
Gerstenberg, Hildesheim 2005. 68 Seiten, € 12,90



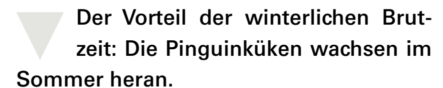
Es ist kaum zu glauben, welche Mühen und Qualen ein antarktischer Kaiserpinguin *(Aptenodytes forsteri)* für seinen Nachwuchs auf sich nimmt. Die reichlich einen Meter großen antarktischen Vögel wandern oder rutschen bäuchlings teilweise mehrere hundert Kilometer übers Eis, um sich zur Balz in riesigen, vom Meer und damit ihrem Futterplatz weit entfernten Kolonien zu versammeln. Hat sich ein Paar gefunden, so legt das Weibchen sein Ei und übergibt es dem Männchen. Durch die lange Hungerzeit während des Hinwegs und zusätzlich durch die Produktion des Eis geschwächt, muss sie als Erste den langen Rückweg zum Meer antreten und sich dort wieder Fett anfressen.

Derweil brüten die Väter die in einer Hautfalte über den Füßen gelagerten Eier aus. Die extreme Kälte und die schneidenden Winde überlebt die Männergruppe nur, weil sie sich eng zusammenkuschelt. Volle drei Monate vergehen, bis die Mütter zurückkehren. Am charakteristischen Ruf erkennen sie ihren Partner und würgen für ihre mittlerweile geschlüpften Küken mehrere Kilogramm vorverdauten Fisch portionsweise hervor. Dann erst dürfen die Väter ihrerseits fressen gehen – und ihren Kindern etwas mitbringen.

Diese Geschichte von elterlicher Fürsorge unter widrigsten Umständen ist an sich schon anrührend genug. Hinzu kommt, dass die Pinguine durch ihre aufrechte Haltung und das frackartige Federkleid unmittelbar menschlich anmuten. Ihr langsamer Watschelgang, feierlich und komisch zugleich, ist dazu angetan, zusätzlich Sympathie zu erregen, und die kleinen Pinguinküken in ihrem flauschig grauen Federkleid sind einfach herzerweichend niedlich.

Der Film »Die Reise der Pinguine« erzählt die Geschichte von der Wanderung zur Brutkolonie bis zum Selbstständigwerden der Jungvögel. Und eben die Menschenähnlichkeit seiner Helden betont er durch seine gesamte Dramaturgie. Während die fantastischen Aufnahmen dem Vergleich mit Filmen wie »Nomaden der Lüfte« und »Deep Blue« standhalten, wirkt er im Ganzen weniger wie eine Dokumentation als wie eine epische Tiergeschichte. Aber hier werden keine Dressurakte oder Cartoonbilder geboten, sondern atemberaubendes echtes Leben, und der eigentliche Autor ist die Natur selbst. Dieses Konzept geht offensichtlich auf: In Frankreich und den USA zählt »Die Reise der Pinguine« bereits zu den erfolgreichsten Dokumentarfilmen aller Zeiten.

Ich finde es allerdings sehr gewöhnungsbedürftig, dass die Pinguine selbst die Erzähler in diesem Film sind und über ihre Gefühle und Eindrücke reden – vor allem weil einige der Dialoge ins Schwülstige abgleiten. Aber auch die Anfälle von Melodramatik und übertriebener Vermenschlichung haben mich nicht daran gehindert mitzufühlen, wenn Pinguinmännchen und -weibchen ihre mühseligen Wanderungen antreten, ihre Eier oder sogar Küken verlieren. Wenn in der



Der Vorteil der winterlichen Brutzeit: Die Pinguinküken wachsen im Sommer heran.



Kaiserpinguine sind hervorragende Schwimmer. Sie schießen mit großer Eleganz aus dem Wasser – für eine eher komische Bauchlandung.

Kolonie ein feindlicher Raubvogel auftaucht und die Jungen bedroht, zittert man mit. Und natürlich wirkt das Kindchenschema, wenn der Zuschauer die tapsigen kleinen Federknäuel in der typischen Pinguinschlange dahinwatscheln sieht.

Noch mehr als die manchmal zu bombastischen Sprüche, die den Tieren in den Schnabel gelegt werden, hat mich der Mangel an Informationen gestört. Da wird nur erklärt, was – nach der Auffassung des Regisseurs – einem Pinguin in den Sinn kommt. Der fühlt sich durch eine »magische Kraft« zum traditionellen Brutplatz gezogen; aber welchen Überlebensvorteil diese überaus kräftezehrende Wanderung bieten könnte, erfährt der Zuschauer nicht. Er muss sich diese und viele andere Einzelheiten selbst zusammenreimen – immer mit dem dummen Gefühl, vielleicht doch etwas falsch verstanden zu haben. Und das stört umso mehr, weil der Film so lebhaft das Interesse an den Pinguinen und ihrem Leben weckt.

Mein Ratschlag: Werfen Sie vorher einen Blick in das Buch zum Film. Auch hier liegt zwar der Schwerpunkt auf den Bildern, aber es wird doch einiges Wissenswerte berichtet. Ebenfalls einen Blick wert ist die Website zum Film: www.diereisederpinguine.de. Oder lesen Sie die Darstellung auf http://de.wikipedia.org/wiki/Kaiserpinguin nach. Aber lassen Sie sich diesen wunderbaren Film nicht entgehen.

Elke Reinecke

Die Rezensentin ist Redakteurin bei Wissenschaft Online in Heidelberg.

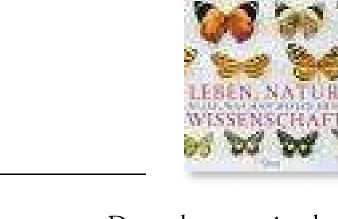
WISSENSCHAFT ALLGEMEIN

Detlev Ganten, Thomas Deichmann, Thilo Spahl

Leben, Natur, Wissenschaft

Alles, was man wissen muss

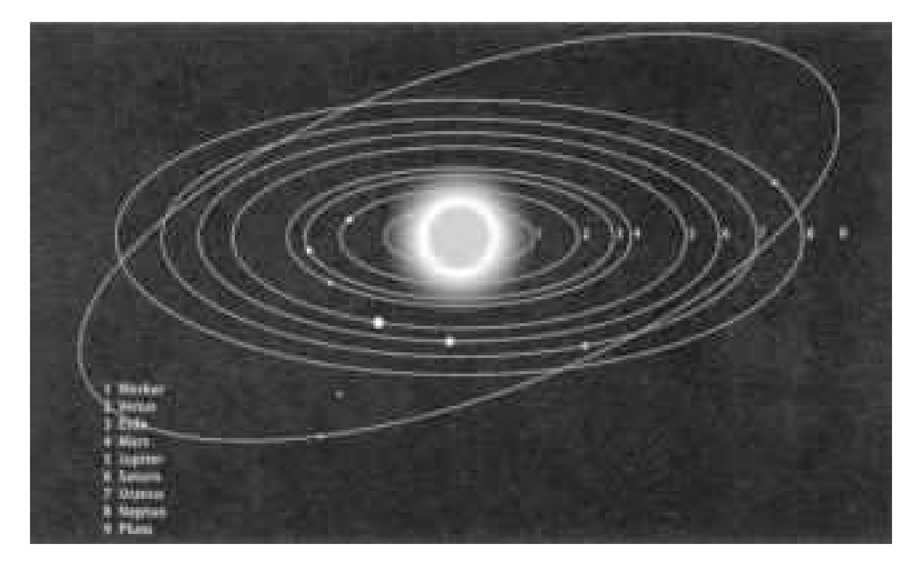
Eichborn, Frankfurt am Main 2003. 608 Seiten, € 24,90



Der Anspruch der Autoren ist durchaus universell: »In diesem Buch haben wir zusammengestellt, was man über das Leben, die Natur und Wissenschaft selbst wissen sollte, um sich zu Beginn des dritten Jahrtausends an der Suche nach der Wahrheit zu beteiligen und bei der Gestaltung der Zukunft engagieren zu können.« Die Reihenfolge ist bewusst gewählt. Anders als in den neueren Ausgaben der Encyclopædia Britannica, die mit dem Thema »Materie« beginnen und von dort in die verschiedenen Wissenschaftszweige überleiten, ist Ausgangspunkt der Darstellung und wichtigstes Thema das Leben; alles andere ordnet sich dem unter. Das geht so weit, dass Kapitel wie »Materie und Energie« und »Raum und Zeit« unmittelbar vor »Außerirdisches Leben« im Großkapitel »Leben im Universum« zu finden sind.

Detlev Ganten, Direktor des Max-Delbrück-Centrums für Molekulare Medizin in Berlin-Buch und in vielen Gremien wirkender Wissenschaftsmanager, hat sich für dieses Buch mit Thomas Deichmann, Chefredakteur von »Novo«, dem »Magazin für Zukunftsdenker«, und dem freien Journalisten Thilo Spahl zusammengetan.

Der Stil des Buchs knüpft an die Tradition der Salongespräche des 19. ▷



Die nachgebesserte Version der Abbildung vom Sonnensystem: Die Planetenbahnen sind da, aber die Sonne steht immer noch falsch.

Jahrhunderts an, ein redaktioneller und schriftstellerischer Kunstgriff, der dem Buch sicherlich breite Käuferkreise über die primär an der Wissenschaft Interessierten hinaus sichert. In dem Kapitel »Natürliche Ressourcen« folgt auf einen kurzen Abriss der Bedeutung und der Verfügbarkeit von fossilen Brennstoffen unvermittelt und wenig motiviert ein Plauderabsatz über die Herkunft des Wortes »Kaue« für den Umkleideraum der Bergleute. Wollten die Autoren den ehemaligen Kollegen von der Universität Hamburg in Sachen »Bildung« Konkurrenz machen? Dann aber bitte richtig: Das Wort »Kaue« hieß im Mittelhochdeutschen »Kouwe« und bezeichnete nicht ein Waschhaus, sondern das Schachthäuschen; herzuleiten vom lateinischen Wort »Cavea« für Käfig.

So liest sich das Buch ganz angenehm und führt den Leser unmerklich über die Theorie vom Urknall und den oben genannten Schnelldurchgang durch die Physik bis hin zu den Themen »Menschwerdung« und »Mensch und Genom«, um sich abschließend der Frage der Evolution des Geistes und der Frage der Bewusstwerdung zu widmen. Hier knüpfen die Autoren – etwa mit den vertrauten Vexierbildern – an alte Traditionen aus der frühen Zeit der Physiologie und Informationsverarbeitung an, berücksichtigen aber nicht, was etwa die moderne Mathematik und Informatik in die Debatte über Bewusstsein einzubringen hat. Gerade im Zusammenhang mit den Erkenntnissen zur Sprachforschung und der algorithmisch-physikalischen Durchdringung der heute von Menschen »beherrschten« Welt wäre da einiges zu sagen gewesen.

Das Buch bietet am Ende eine interessante und empfehlenswerte Zusammenstellung wichtiger Bücher der Vergangenheit zum Weiterlesen sowie eine grobe Übersicht über die Entwicklung der Wissenschaften, für die man den Autoren sehr dankbar sein muss.

Der Schlusssatz lautet: »Wir hoffen, mit dem vorliegenden Buch zu einem vergnüglichen Verständnis der Gegenwart beigetragen und Lust auf die gemeinsam gestaltete Zukunft geweckt zu haben.« Vergnügen haben die Autoren mir nun nicht gerade auf meinem Spezialgebiet Quanteninformatik gemacht, dafür aber bei einem falsch korrigierten Fehler (Bild): Hätten sie doch die technisch missratene Abbildung der Planetenbahnen des Sonnensystems nicht durch ein Erratums-Blatt nachzubessern versucht! Dann hätte nämlich niemand bemerkt, dass die Sonne im Mittelpunkt der elliptischen Planetenbahnen eingezeichnet ist statt in einem der Brennpunkte, wie es sich nach den Kepler'schen Gesetzen gehört. Den Autoren möge zum Trost gereichen, dass die Bank of England auf ihrem Ein-Pfund-Geldschein Anfang der 1980er Jahre denselben Fehler gemacht hatte und die Banknoten kurz darauf wieder einziehen musste.

Thomas Beth

Der Rezensent war Professor für Mathematik an der Universität Karlsruhe. Er ist am 17. August gestorben; die vorliegende Fassung hat er nicht mehr autorisieren können.



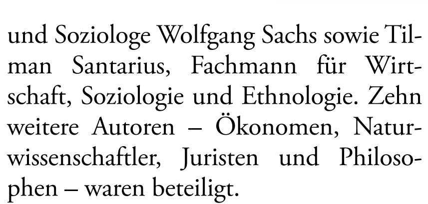
WELTWIRTSCHAFT

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (Hg.)

Fair Future. Der Wuppertal-Report

Begrenzte Ressourcen und globale Gerechtigkeit

C.H.Beck, München 2005. 280 Seiten, € 19,90



Nicht nur der Ölpreis steigt, auch viele andere Rohstoffe werden immer knapper und teurer. Die Weltwirtschaft stößt an natürliche Grenzen. Die Frage, wohin der Handel die Rohstoffe verfrachtet und warum das oft zu unfairen Bedingungen geschieht, beschäftigt nicht nur Globalisierungskritiker. Konferenzen wie das Weltsozialforum oder die Treffen der G8-Länder erregen allgemeine Aufmerksamkeit.

Das Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie hat jetzt einen »Report« zur Gerechtigkeitsfrage herausgegeben. Drei Jahre lang hatte eine Forschungsgruppe das Thema »Welche Globalisierung ist zukunftsfähig?« untersucht. Das Buchprojekt leiteten der vor Kurzem in den Club of Rome berufene Theologe und Soziologe Wolfgang Sachs sowie Tilman Santarius, Fachmann für Wirtschaft, Soziologie und Ethnologie. Zehn weitere Autoren – Ökonomen, Naturwissenschaftler, Juristen und Philosophen – waren beteiligt.

Die Bezeichnung »Report« klingt nach Faktenreichtum und empirischen Studien. Das erste Kapitel beginnt jedoch mit einem historischen Exkurs. Von der Entdeckungsfahrt des Kolumbus spannt Wolfgang Sachs einen Bogen zum Terror des 11. September 2001. Ein halbes Jahrtausend nach ihrem Beginn wende sich die Globalisierung gegen ihren Urheber, den Westen: »Auch die Mächtigen werden – wie der Angriff auf das World Trade Center zeigt – von den Leidensfolgen ihrer fernen Taten heim-

gesucht.« Eine politisch höchst dubiose Aussage.

Über den Ressourcen verschwendenden Welthandel kommt der Autor zur Tugend der ökologischen Gerechtigkeit, die auch Fairness zwischen Menschen und anderen Lebewesen erfordere. Der akademisch-pastorale Jargon erinnert an den Katechismus einer Naturreligion: »Das Leben erweist sich als kommunitäre Veranstaltung; ein Gewebe vielfältiger Beziehungen konstituiert das Einzelwesen, die Anemone ebenso wie den Affenbrotbaum, den Wurm ebenso wie den Wal.« Beim Fazit gut 30 Seiten später ist Sachs wieder im vertrauten Fahrwasser des Wuppertal Instituts: »Es ist hohe Zeit, das Industriemodell der Wohlstandsmoderne auf den Prüfstand zu stellen.«

Nach dem eher theoretischen Einstieg bringt das zweite Kapitel harte Fakten über die Machtstrukturen des Welthandels. Die natürlichen Ressourcen werden ungerecht verteilt; was sind die Ursachen dafür? Die Autoren prangern vor allem die Marginalisierung armer Bevölkerungsgruppen und unfaire internationale Vereinbarungen an, etwa einseitige Zölle. Abhilfe soll eine transnationale Ethik der Ressourcengerechtigkeit schaffen. Die Autoren berufen sich auf die Kant'sche Utopie einer Weltbürgergesellschaft, was angesichts der Vielzahl undemokratischer bis despotischer Regime, von China über Weißrussland bis Simbabwe, überaus realitätsfern wirkt.

Auf die Bestandsaufnahme folgen Lösungsvorschläge, etwa das »Leapfrogging«, das Überspringen inzwischen überholter Technologien. Die Entwicklungsländer brauchten so nicht unsere Fehler zu wiederholen, sondern würden beispielsweise gleich ihren Energiebedarf dezentral aus regenerativen Quellen befriedigen.

Prinzipiell solle die Politik die Globalisierung leiten und nicht der Markt. Um einen faireren Handel zu schaffen, sollten etwa Handelsverträge den deutlich schwächeren Partner begünstigen. Eine ehrenwerte Idee, deren geschichtliche Einordnung jedoch fragwürdig ist: Das Konzept vom Primat der Politik stamme aus der europäischen Aufklärung und damit aus der Antike, während das Konzept der marktgeleiteten Globalisierung sich »bis zur Freihandelsidee im England des 18. Jahrhunderts zurückverfolgen« lasse. Das ist nur die halbe ▷

▷ Wahrheit: Auch der Gedanke des Freihandels wurzelt in der Aufklärung.

Handelsliberalisierung kann der wirtschaftlichen Entwicklung durchaus nützen, wie die Autoren im vorletzten Kapitel selbst anerkennen: Die differenzierten Ausführungen unter dem Titel »Verträge für Fairness und Ökologie« heben sich wohltuend vom Rest des Buchs ab.

Im Schlusskapitel mutiert der Report mit einem Schlag zum politischen Strategiepapier für Europa. Die Autoren hoffen, der Kontinent möge zu einer »kristallisierenden Kraft für eine demokratische und ökologische Weltgesellschaft« werden. Doch müsse sich Europa jetzt entscheiden zwischen der präventiven Kriegsführung der USA und »den Marktfundamentalisten« einerseits, »präventiver Gerechtigkeit« und »Koalitionen mit gleichgesinnten Staaten« andererseits.

Blenden wir, um zu bilanzieren, die politische Missionierung kurz aus. Viele Informationen in dem Buch regen zum Nachdenken an, gewiss. Die Erkenntnis, dass die entwickelten Länder ihren Wohlstand teilweise dem Export von Umweltschäden und unfairen Handelsverträgen verdanken, ist zwar nicht neu, wird in diesem Buch aber sehr klar und ausführlich belegt.

Doch die Lektüre des Reports hinterlässt einen üblen Nachgeschmack: Die vielen Daten und Literaturhinweise stützen eine einseitige Weltanschauung. Diese richtet sich gegen Wirtschaftsliberalismus und die US-Regierung, zwei Feindbilder, die gepflegt und gehätschelt werden. Wer von der Wuppertaler Denkfabrik einen ausgewogenen Report erwartet hatte, den wird »Fair Future« enttäuschen – und Anemone, Wurm und Wal haben auch nichts davon.

Sven Titz

Der Rezensent ist promovierter Meteorologe und freier Journalist in Berlin.



LEBEN

Gunter Dueck

Topothesie

Der Mensch in artgerechter Haltung

Springer, Heidelberg 2005. 400 Seiten, € 34,95

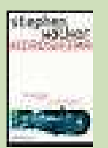
Dieser Band vollendet zusammen mit »Omnisophie« (Spektrum der Wissenschaft 11/2003, S. 88) und »Supramanie« (4/2004, S. 101) eine Trilogie und bringt damit einen langen gedanklichen Weg zu einem vorläufigen Abschluss.

Angefangen hat Gunter Dueck, Mathematiker, Manager und inzwischen renommierter Freidenker bei IBM, in seiner unmittelbaren Arbeitsumgebung. Sorgfältig hat er die modernen Managementprinzipien, vor allem die Zerlegung der Arbeitsleistung in messbare Kleinteile und die an deren Messung orientierte Entlohnung, zerpflückt und ihre absurden Konsequenzen beschrieben. Dieses Übel – lauter intelligente Menschen wollen das Beste und schaffen großes Leiden – hat er damit erklärt, dass die Menschen ihre Verschiedenheit nicht anerkennen. Indem ein Mensch alle Mitmenschen gleich behandelt, behandelt er den größten Teil von ihnen falsch. In Wirklichkeit, so Dueck, gibt es drei verschiedene Sorten von Menschen, die er »richtige«, »wahre« und »natürliche« nennt. Und jede Sorte hat ihre artgerechten Haltungsbedingungen – im Prinzip wie Legehühner oder Balkontomaten, die Dueck gerne als Beispiel anführt, nur etwas komplizierter.

In dem vorliegenden Band beschreibt Dueck, dem Untertitel entsprechend, denn auch ausführlich, wie mit jeder Sorte Mensch umzugehen ist, sei es der Untergebene in der Arbeitswelt, das eigene Kind oder auch die Ehefrau. Wieder führt der Autor ein angeregtes, ausschweifendes Gespräch mit seinem Leser, in das viel Persönliches einfließt.

Diesmal kommt allerdings ein neues Element zu seinem Gedankengebäude hinzu. Es ist wieder eine Einteilung; sie hat auch eine oberflächliche Ähnlichkeit mit der Unterscheidung zwischen wahren und richtigen Menschen, aber sie betrifft Menschen jeder Sorte. Dueck nennt sie »alpha« und »beta« nach zwei Typen von Wellen, die im Elektroenzephalogramm (EEG) des Menschen zu

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online



Stephen Walker

Hiroshima

Countdown der Katastrophe

Bertelsmann, München 2005, 399 Seiten, € 19,90

Das Buch, dem eine BBC-Fernsehdokumentation vorausging, hat seine Stärken genau an den Stellen, an denen es die Herkunft seines Autors als preisgekrönter Dokumentarfilmer durchscheinen lässt: Wie eine BBC-Dokumentation wirkt es mitreißend, erstklassig recherchiert, voller überraschender Details. Diese gute Lesbarkeit hat ihren Preis im mangelnden systematischen Aufbau des Buches und den Verzicht auf Verweise und vertiefende Fußnoten.

Ein beklemmendes Gefühl schleicht sich beim Lesen ein. Mit dem erfolgreichen Test der Bombe scheint ihr Einsatz so zwangsläufig zu sein wie der nächste Winter. Der freie Wille findet in diesem Countdown keinen Platz, die letzte Begründung, über die man einen Diskurs führen könnte, bleibt aus.

Aus der Rezension von Stefan Taube

5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■
Vermittlung	■■■
Verständlichkeit	■■■■■
Lesespaß	■■■■■
Preis/Leistung	■■■■
Gesamtpunktzahl	21

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter **http://www.wissenschaft-online.de/rezensionen**

finden sind: Alpha-Wellen sind relativ langsam und typisch für entspannte Gemütszustände mit frei schweifenden Gedanken, während die schnelleren, kleineren Beta-Wellen immer dann einsetzen, wenn der Mensch wach ist und seine Aufmerksamkeit auf etwas Bestimmtes richtet. Die in der Kindheit vorherrschenden Alpha-Wellen geben irgendwann im Jugendalter ihren Vorrang an die Beta-Wellen ab, um im Alter wieder stärker hervorzutreten.

Für Dueck geht jedoch der Unterschied zwischen alpha und beta weit über irgendwelche Kennzeichen des EEGs hinaus. Alpha ist ursprünglich, echt, der Zustand, in dem der Mensch eigentlich sein will und in dem er Gutes (Energie, Kreativität, Liebe …) verströmt, ohne auf eine Gegenleistung bedacht zu sein. Beta ist aufpassen, Regeln einhalten, ein Wettbewerbsziel anstreben, bewusste Kontrolle. In Alpha erbringt der Mensch eine Leistung um ihrer selbst willen, in Beta, weil er damit Punkte machen oder eine seelische Wunde pflegen will.

Für die Arbeitswelt liegt die Folgerung auf der Hand: Lass die Menschen im Alpha-Modus arbeiten, störe sie insbesondere nicht durch absurde Leistungsmessungen oder durch Erzeugung von Angst, und du wirst mehr an Leistung von ihnen ernten als durch das übliche Zuckerbrot-Peitsche-System.

Alpha ist der Mensch von allein, beta wird er erst dadurch, dass andere, vor allem Erzieher und Vorgesetzte, ihm Verwundungen zufügen, zu deren Kompensation verschiedene Beta-Akte dienen: hohe Leistungen im Wettbewerb zur Erzielung von Anerkennung, Disziplin zur Vermeidung von Maßregelung und so weiter. Dabei »muss die Beta-Seele eben auch ihr Hauptproblem bewältigen, nämlich die Alpha-Seele. Nicht selten tötet sie sie«.

»Im Betazustand wird das Leben bewältigt und täglich neu vorbereitet. Im Alphazustand wird gelebt.« Das liest man nur zu gern. Authentisch sein, sich selbst verwirklichen frei von den Zwängen der Gesellschaft, Ausgang aus der selbst verschuldeten Unmündigkeit, der Mensch ist frei geboren und lebt doch in Ketten, und wenn ihr nicht werdet wie die Kinder … Diese Zitate sind nicht von Dueck, aber darauf läuft es hinaus. Von seinem sehr speziellen Ausgangspunkt als Computerfachmann und Manager gelangt er zu Weisheiten über den Menschen, die nicht neu, aber mir lieb und wert sind. Und anders als klassische Vorbilder plädiert er nicht dafür, die Gesellschaft als Ursache aller Beta-Zustände radikal zu verändern oder ihr den Rücken zu kehren. Es genügt vielmehr die »artgerechte Haltung des Menschen«.

Es kommt nicht darauf an, die Welt zu verändern, sondern auf die artgerechte Haltung des Menschen

Indem der Autor das Spannungsfeld von alpha und beta zu seinem Hauptthema macht, rückt die Einteilung der Menschen in Sorten in den Hintergrund – für mich persönlich beruhigend, weil ich von Duecks scharfer Trennung zwischen richtigen, wahren und natürlichen Menschen nie wirklich überzeugt war. Aber wie ist es mit der scharfen Trennung zwischen alpha und beta? ▷

▷ Schwierig, wenn man länger darüber nachdenkt. Eine meiner schönsten Alpha-Tätigkeiten ist Klavierspielen. Aber das dafür unabdingbare Üben finde ich ziemlich beta, auch heute noch. Und früher erst! Meine Eltern mussten beträchtliche Mühe, sprich ein großes Sortiment an Beta-Erziehungsmaßnahmen, aufwenden, um mich ans Üben zu kriegen. Ähnliches gilt für so ziemlich jede Aktivität, durch die man sich selbst verwirklichen kann – wenn man es dann endlich kann. Allgemeiner scheint es, dass Beta oft genug die Voraussetzungen für Alpha erst schafft und dafür auch unentbehrlich ist.

Die platte Gleichsetzung »alpha ist gut, beta ist schlecht« steht nirgends in dem Buch. Sie wird nur nahe gelegt – und kann so nicht stimmen. Irgendwo muss es da noch einen Unterschied zwischen gutem und schlechtem Beta geben; aber der ist im Einzelfall nicht einfach zu finden, wie man bald merkt, wenn man ein wildes Alpha-Kind artgerecht erziehen will.

Am Ende seines Buchs geht Dueck über alpha und beta noch hinaus zu theta. So heißen die Gehirnwellen, die man im EEG von Menschen im Zustand der Trance oder tiefen meditativen Versunkenheit findet. Und mit der für ihn typischen Kühnheit verknüpft er das mit Überlegungen aus der Computerwissenschaft, genauer der Theorie neuronaler Netze: dass es Erkenntnisse gibt, die man haben kann, ohne sagen zu können, wie man dazu kommt. Dieses mathematisch nachweislich Unerforschliche nennt er Gott und den Theta-Zustand einen Weg, ihm näher zu kommen. »Gott existiert, ob es ihn gibt oder nicht.«

An dieser Stelle weicht Duecks Gesprächigkeit einer deutlich merkbaren Zurückhaltung. Vielleicht hat er weiter gehende Vorstellungen, die er der öffentlichen Kritik noch nicht aussetzen will. Auf mich wirken seine Gedanken an dieser Stelle unausgegoren – aber faszinierend.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

KOMMENTAR

Die Geister, die ich rief

Wie Atommüll das Land überzieht

»Walle! Walle manche Strecke, dass, zum Zwecke, Wasser fließe und mit reichem vollen Schwalle zu dem Bade sich ergieße.« – Mit diesen Worten entfesselt Goethes Zauberlehrling seinen dienstbaren Geist. Ähnlich euphorisch waren die Erwartungen an die friedliche Nutzung der Kernspaltung. Die vielfältigen Folgen wurden dabei unterschätzt. Die Menge an radioaktivem Müll wächst stetig, doch die Debatte darüber wird immer leiser. Die Argumente sind getauscht, die Gräben vertieft. Scheinbar herrscht Stillstand.

Doch der Status quo ändert sich gerade grundlegend. Bis vor Kurzem ging zumindest ein Teil der radioaktiven Abfälle in die Wiederaufbereitungsanlagen La Hague (Frankreich) und Sellafield (England). Dort werden aus den verbrauchten Brennstäben Uran-235 und Plutonium extrahiert, die in Mischoxid-Brennelementen weiterverwendet werden können. Außer neuem Material für die Atomkraftwerke entstehen aber auch zusätzliche atomare Spaltprodukte. Ingesamt fällt so paradoxerweise mehr radioaktiver Müll an als bei einem Verzicht auf die umstrittene Technik. Dies ist einer der Gründe, warum nun seit dem 30. Juni dieses Jahres die Transporte nach La Hague und Sellafield verboten sind.

Mit der Wiederaufbereitung beerdigte die Politik zugleich das Konzept eines zentralen Zwischenlagers. Ohne den Transport ins Ausland oder einen Standort für ein Endlager schien eine bundesweite Sammelstelle nicht mehr nötig. Nützlicher Nebeneffekt: Das Thema verschwindet aus der öffentlichen Wahrnehmung.

Zwar wird der aus England und Frankreich zurückkommende Atommüll weiterhin in Gorleben geparkt. Doch der beständig anfallende hochradioaktive Abfall aus den Atomkraftwerken landet in dezentralen Zwischenlagern. Zwölf davon hat das Bundesamt für Strahlenschutz genehmigt. In Lingen ist schon eines in Betrieb. Laut Bundesministerium für Strahlenschutz sollten die anderen elf etwa ab Jahresanfang 2006 betriebsbereit sein. Was einst in Gorleben die Massen bewegte, sprießt nun bundesweit. Die atomare Flut ergießt sich über das ganze Bundesgebiet, aber niemand erregt sich. – »Und sie laufen! Nass und nässer wirds im Saal und auf den Stufen: Welch entsetzliches Gewässer!«

Ohne Endlager ändert sich nichts an diesem Missstand, doch eine Lösung ist nicht in Sicht. Vor fünf Jahren, am 5. Oktober 2000, wurde die Erkundung des Salzstocks in Gorleben ausgesetzt und ein Arbeitskreis Kernenergie eingerichtet. Am 17. Dezember 2002 übergab er seinen Abschlussbericht. Dieser empfiehlt klar die Lagerung in tiefen geologischen Schichten, lässt die Frage nach dem Wirtsgestein aber offen. Immerhin nennt er detaillierte Kriterien für die Suche eines Endlagers.

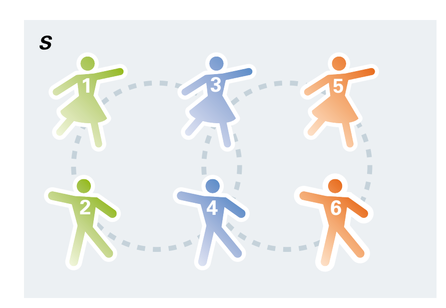
Derweil streiten weltweit die Experten über die beste Variante. Zur Debatte stehen Ton, Granit und Salz. Bezeichnenderweise favorisieren Länder ohne geeignete Salzstöcke allesamt die Endlagerung in Granit. Ein Ende der jahrzehntelangen weltweiten Diskussionen aber zeichnet sich nicht ab. – »Herr, die Not ist groß! Die ich rief, die Geister, werd ich nun nicht los.«

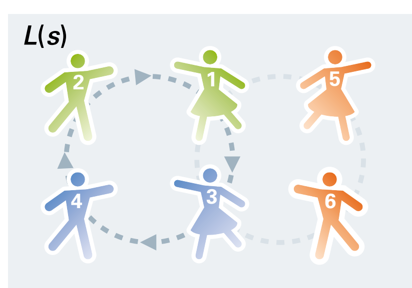
Der hochradioaktive Müllberg ist da und türmt sich mit jedem Tag höher auf. Ihn über das ganze Land zu verteilen macht ihn nicht kleiner, sondern nur gefährlicher. Umso wichtiger ist gerade jetzt eine realistische Debatte. Die Lagerung in tiefen geologischen Schichten erscheint in jedem Fall als das kleinere Übel. Man muss nur bedenken, dass auch hier niemand eine Sicherheit von einer Million oder auch nur 10000 Jahren garantieren kann. Bei der Suche nach einem vorläufigen Endlager sollte daher die Chance der Rückholbarkeit im Vordergrund stehen. So bleibt die Option gewahrt, schnell auf neue Erkenntnisse reagieren zu können. Zumindest bis eine bessere Lösung gefunden ist und es vielleicht doch noch heißen kann: »In die Ecke, Besen! Besen! Seids gewesen!«

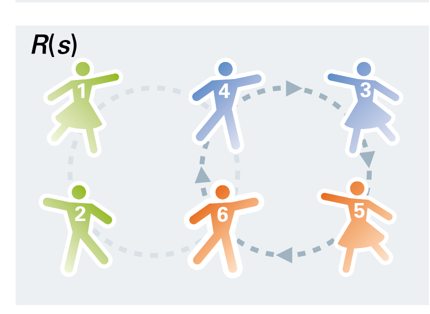
Stefan Keilmann ist freier Wissenschaftsjournalist mit einem B. A. in Germanistik und Philosophie.

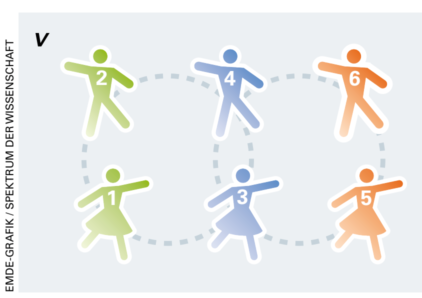
Englisch Tanzen in S_6

Ein Problem, das sich aus den Bewegungen einer Tanzgruppe ergibt, wird von einer losen Gruppe von Mathematikern über das Internet gelöst – mit Gruppentheorie.









EMDE-GRAFIK / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Englisch Tanzen in Essex (S_6): Jede Tanzbewegung ist entweder *L* – die vier linken Tänzer wandern um 90 Grad im Uhrzeigersinn im Kreis – oder *R* – dieselbe Bewegung für die rechten vier Tänzer. Lässt sich durch Kombination dieser Bewegungen die Startaufstellung *s* in die Aufstellung *v* überführen, bei der die Partner jedes Paars vertauscht sind?

Von Christoph Pöppe

Beim bunten Tanzabend stellten sich die Paare im Kreis auf, die Mädchen außen, die Jungen innen. Gespielt wurde das englische Kinderlied von dem Hund des Bauern, der Bingo hieß. Am Ende jeder Strophe war der Name »Bingo« auf Englisch zu buchstabieren; mit jedem Buchstaben wanderten Jungen wie Mädchen eins nach links, dabei mit dem jeweils nächsten Tanzpartner Hände klatschend, und auf »O!« war es angesagt, dem dann aktuellen Tanzpartner in die Arme zu fallen – mehr oder weniger intensiv, je nach persönlichem Geschmack.

An jenem Abend hatte es mir Sabine mit ihren wunderschönen dunklen Knopfaugen angetan. Wir waren beide auf der Tanzfläche, »Bingo« wurde gespielt bis zum Abwinken, und in meinen Armen fanden sich viele Mädchen – aber nie Sabine! Wirklich schade.

Im Nachhinein ist der Grund dafür ziemlich klar: Offensichtlich war die Gesamtzahl der Paare auf der Tanzfläche ein Vielfaches von 5, sagen wir $5n$. Nach n Strophen Bingo hat man wieder seine Partnerin vom Anfang im Arm, das ganze Spiel beginnt von Neuem, und die restlichen $4n$ Mädchen bleiben unerreichbar.

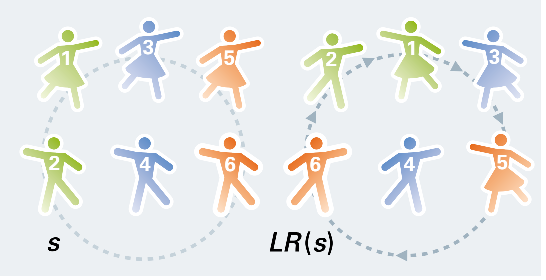
Wie heißt die Wissenschaft von den Tanzgruppen? Gruppentheorie! Nur sind die Mitglieder der mathematischen Gruppen nicht einzelne Knaben oder Mädchen, sondern ganze Bewegungen. »Alle Mädchen eins nach links rücken« ist ein Beispiel eines Gruppenelements; nennen wir es M. Man kann mehrere Bewegungen hintereinander ausführen: »Erst alle Mädchen eins nach links, dann alle Jungen eins nach rechts« ist auch eine Bewegung und damit ein Element der Gruppe. Wenn J die Bewegung »alle Jungen eins nach rechts« ist, nennt man die zusammengesetzte Bewegung einfach JM, in dieser – etwas gewöhnungsbedürftigen – Reihenfolge.

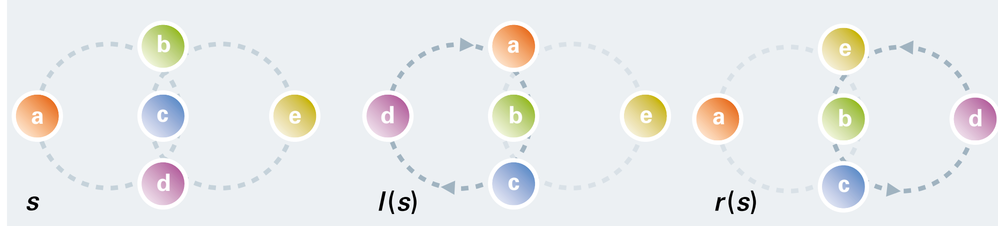
Allgemein spricht man von einer Gruppe, wenn man zwei ihrer Elemente irgendwie miteinander verknüpfen kann und dadurch wieder ein Element erhält. Dass die Elemente Bewegungen oder allgemeiner irgendwelche Abbildungen sind und die Verknüpfung darin besteht, diese Bewegungen hintereinander auszuführen, ist nur eine – wichtige – von vielen Möglichkeiten. Die Gruppenelemente können auch Zahlen sein und ihre Verknüpfung die Addition oder die Multiplikation zweier Zahlen. Wichtig ist, dass die Verknüpfung stets durchführbar und obendrein stets widerruflich ist: Zu jedem Element muss es ein »inverses« Element geben, das heißt eines, das dessen Wirkung gerade umkehrt. Der Vollständigkeit halber zählt man Nichtstun auch zu den Bewegungen; man nennt es das »neutrale Element« der Gruppe.

Das ist das Schöne an der Gruppentheorie: Sie ist so abstrakt, dass sie auf vielerlei passt, auf Bewegungen auf der Tanzfläche ebenso wie auf ganz gewöhnliche Zahlen und noch viel mehr. Was man aus dem einen Gebiet weiß, kann man auf das andere übertragen. So sind unsere Bewegungen im Rundtanz »eigentlich« nichts weiter als ganze Zahlen – »eins nach links« ist dasselbe wie 1 –, und die Verknüpfung von Abbildungen entspricht der Addition der entsprechenden Zahlen, allerdings mit einer kleinen Spezialität. Wenn dreißig Paare auf der Tanzfläche sind, dann ist dreißigmal nach links dasselbe wie Nichtstun – jedenfalls im Ergebnis –, oder auch $30=0$. Also ist unsere Tanzflächengruppe nicht die additive Gruppe $\mathbb{Z}$ der ganzen Zahlen, sondern die Gruppe $\mathbb{Z}_{30}$ der ganzen Zahlen »modulo 30«: Man rechnet wie gewohnt, nur addiert oder subtrahiert man bei Bedarf Vielfache von 30, um im Zahlenbereich von 0 bis 29 zu bleiben.

Bingo!

Wenn nun die einzig erlaubte Bewegung »fünf nach links« ist – nennen wir sie B wie Bingo –, geht es um die »von B erzeugte Untergruppe«. Das ist die Menge aller Elemente, die durch beliebig häufige Anwendung von B entstehen. In unserer Darstellung durch ganze Zahlen modulo 30 ist $B=5$, und die von B erzeugte Untergruppe ist schnell hingeschrieben: 5, 10, 15, 20, 25, 30, aber $30=0$, und neue Elemente kommen nicht hinzu. Die von B erzeugte Untergruppe hat nur sechs Elemente. Wären





EMDE-GRAFIK / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Die Bewegung *LR* (das »Produkt« von *L* und *R*) lässt Tänzer 4 an seinem Platz, während die anderen in einem Fünferkreis einen Platz im Uhrzeigersinn weiterrücken. Rechts die reduzierte Tanzformation von Wolfgang Thumser mit den elementaren Bewegungen *l* und *r*.

es nur 29 Paare gewesen oder irgendeine andere Zahl, die zu 5 teilerfremd ist, dann wäre die von *B* erzeugte Untergruppe gleich der ganzen Gruppe gewesen. Wirklich schade.

Das waren viele große Worte für den netten kleinen Ringeltanz. Aber es gibt eine Erwachsenenversion, und die geht so: Drei Paare stehen einander gegenüber, und es gibt zwei erlaubte elementare Bewegungen namens *L* und *R* (Bild links): *L* bedeutet, dass die linken vier Tänzer im Uhrzeigersinn einen Platz weiterrücken, *R* bedeutet dasselbe für die rechten vier Tänzer. Kann man erreichen, dass die Paare wie in der Startaufstellung stehen, aber mit Platztausch zwischen Dame und Herr?

Das Problem hat seinen Ursprung in einer Newsgroup namens de.sci.mathematik. Unter den Leuten, die in diesem Internet-Forum täglich einige Dutzend Beiträge veröffentlichen, sind auch Anwender und Schüler, die zu einem konkreten Problem Rat suchen; der harte Kern aber besteht aus Profis, die untereinander neue mathematische Probleme diskutieren, aus Blickwinkeln, die so unterschiedlich sind wie die Beteiligten. Legendär ist der »gute Geist« der Newsgroup, Hermann Kremer, der nicht nur zu den exotischsten Fragen binnen Minuten die Website aus dem Ärmel zu zaubern weiß, auf der die Antwort zu finden ist, sondern auch das freundschaftliche Klima innerhalb der Newsgroup maßgeblich geprägt hat.

Die Mitglieder dieses harten Kerns sind mehrheitlich männlich, sehr kommunikativ – untereinander – und nur mit der größten Mühe vom Computer wegzukriegen. Wenn sich diese Leute auch noch leibhaftig, mit Familie, zu einem Mathematikwochenende zusammenfinden, dann bekommen die mitgereisten Angehörigen ihre Ehegatten erst nach dem Ende des eigentlichen Treffens zu fassen – zum Beispiel bei einem Tanzabend. So geschah es, als Rainer Rosenthal seine Newsgroup-Freunde zu sich an den Bodensee einlud – und was machen diese Leute? Kaum sind sie wieder am heimischen Computer, diskutieren sie die Positionen, die sich bei dieser Form des englischen Tanzes ergeben können!

Die mathematische Formulierung der Frage ist schnell gefunden: Enthält die von *L* und *R* erzeugte Untergruppe ein Element, das die Startaufstellung *s* in die Stellung *v* überführt, bei der die Partner jedes Paars die Plätze getauscht haben? Die nächste Frage folgt auf dem Fuße: Untergruppe wovon? In welcher großen Gruppe spielt sich das ganze Ringelreihen ab?

Permutationsgruppen

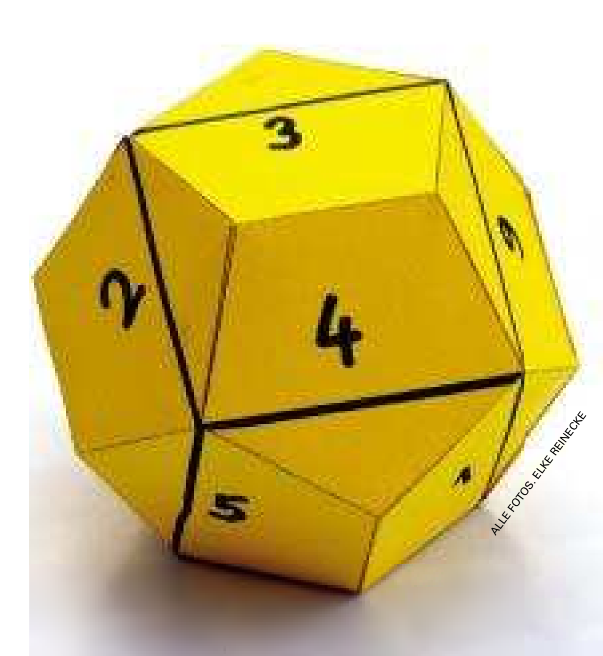
Man nummeriert die Plätze, zum Beispiel von 1 bis 6, so wie die Tänzer in der Startaufstellung bezeichnet sind. Jede beliebige Stellung beschreibt man nun, indem man der Reihe nach aufzählt, welcher Tänzer auf Platz 1, 2, … steht. Unsere Stellung *v* ist (2, 1, 4, 3, 6, 5), das heißt, auf Platz 1 steht 2, auf Platz 2 steht 1 und so weiter. Also ist unsere große Gruppe, in der sich alles abspielt, die Gruppe der Permutationen (Umstellungen der Reihenfolge) von sechs Elementen. Sie ist den Gruppentheoretikern wohlbekannt, heißt S_6 und hat $6! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6 = 720$ Elemente. Rainer Rosenthal hat seinen »Thread« (die Serie der Wortmeldungen) zu diesem Thema »Englisch Tanzen in Essex« genannt; man darf »Essex« auch als »S_6« lesen.

Die von *L* und *R* erzeugte Untergruppe besteht zunächst aus allem, was man durch Aneinanderreihen der Symbole *L* und *R* schreiben kann: *LR*, *RLR*, *LLRR*, … Eine solche Symbolfolge nennen die Gruppentheoretiker ein »Wort« und könnten selbst dann etwas damit anfangen, wenn die Zeichen *L* und *R* überhaupt keine Bedeutung hätten.

Wörter dürfen beliebig lang sein; aber da jedes Wort einer Permutation entspricht, kann es höchstens 720 wirklich verschiedene Wörter geben. Ob aber zwei verschiedene Wörter eigentlich dasselbe sagen, nämlich dieselbe Permutation bezeichnen, ist nicht offensichtlich. Nur dass man Wortteile wie *LLLL* (links einmal im Kreis laufen) oder *RRRR* weglassen kann, sieht man auf einen Blick.

Was tun? Tjark Weber aus München verschafft sich – und der Gruppe – zunächst einen Überblick, und zwar mit einem Programm namens »Waldmeister«, das die Universität Kaiserslautern zur allgemeinen Nutzung ins Netz gestellt hat. Eigentlich ist Waldmeister ein »Theorembeweiser«, also ein Werkzeug für tiefgründig-abstrakte Fundamentalisten. Aber das ist das Schöne an der Abstraktion: Wenn man die Bedeutung von *L* und *R* vorübergehend vergisst, kann man schadlos eine unschuldige Permutation für ein tiefsinniges Theorem halten. »Eine Permutation aus elementaren Bewegungen zusammensetzen« und »ein Theorem aus elementaren Wahrheiten (Axiomen) herleiten« sind von dieser hohen Warte aus dasselbe.

Jedenfalls liefert Waldmeister die Auskunft, dass die Stellung *v* von der Ausgangsstellung *s* aus erreichbar ist, al- ▷



ALLE FOTOS: ELKE REINECKE

Das Dodekaeder mit nummerierten Flächen und einem der fünf Würfel, die im Dodekaeder stecken







Der Würfelfünfling in zwei verschiedenen Stellungen: Eine Drehung setzt an die Stelle des gelben Teilwürfels (oben) den roten (unten). Andere Teilwürfel werden ebenfalls vertauscht; nur der blaue wird zwar gedreht, aber auf sich selbst abgebildet.

▷ lerdings mit reichlich Ringelreihen: *RLLRLRRLRRLRR*. Wenig später entdeckt Rainer Rosenthal, dass es auch mit 11 statt 13 elementaren Bewegungen geht, und zwar auf zwei verschiedene Weisen: *RLLRLRRLRRLRR* = *LLLRLLRRRLR* = *RRRLRRLLLRL*. Verschiedene Leute erkunden die von *L* und *R* erzeugte Untergruppe systematisch und erschöpfend und finden, dass sie 120 Elemente hat.

Bei einer endlichen Gruppe ist die Anzahl der Elemente, die »Ordnung« der Gruppe, eines ihrer wichtigsten Merkmale. Die Ordnung einer Untergruppe ist nämlich stets ein Teiler der Gruppenordnung. Eine Gruppe, die als Ordnung eine Primzahl hat, ist also ziemlich langweilig: Ihre einzige Untergruppe ist die triviale, die nur aus dem neutralen Element besteht. Dagegen gibt es für eine Gruppe der Ordnung 120 – eine Zahl mit vielen Teilern – sehr viele Strukturmöglichkeiten.

Wer ein wenig mit endlichen Gruppen gespielt hat, dem kommt an dieser Stelle in den Sinn, dass $120 = 5!$ die Ordnung der Gruppe S_5 der Permutationen von fünf Elementen ist. Nur: Was hat die Zahl 5 hier zu suchen, wo sich stets vier von sechs Leuten bewegen, aber nie fünf auf einmal?

Das sieht man, wenn man sich die Bewegung *LR* anschaut (man erinnere sich: erst *R*, dann *L*). Im Endeffekt bewegt sich Herr Vier gar nicht, während die anderen fünf Tänzer in einem großen Kreis um ihn herum einen Platz im Uhrzeigersinn weiterrücken (Bild S. 107 oben, links).

An dieser Stelle fällt es Marc Olschok aus Duisburg »plötzlich wie Schuppen aus den Haaren«, dass er die beiden elementaren Tanzbewegungen aus einem ganz anderen Kontext kennt: dem berühmten Rubik-Würfel, jener Zusammensetzung aus $3 \cdot 3 \cdot 3$ Würfeln, bei der durch eine trickreiche Mechanik jede Ebene aus $3 \cdot 3$ Würfeln gegen die anderen verdrehbar ist und die Aufgabe darin besteht, aus einem irgendwie verdrehten Würfel den Urzustand mit einheitlich gefärbten Seitenflächen wiederherzustellen. Hält man sich nämlich den Rubik-Würfel so vor die Nase, dass eine Kante einen von oben nach unten verlaufend genau anschaut, und dreht die beiden an diese Kante grenzenden Ebenen, dann vollführen die Eckwürfelchen genau die Bewegungen unserer Tänzer!

Die Bewegungen des Rubik-Würfels werden beschrieben durch eine Gruppe – was sonst? –, und diese Gruppe ist ausgiebig studiert worden, als der Rubik-Würfel in Mode war (Spektrum der Wissenschaft 5/1981, S. 16). So braucht Marc Olschok nur in seinen alten Unterlagen nachzuschauen, um die Zahl 5 auch in der Rubik-Gruppe wiederzufinden. Obendrein findet er als alter Rubik-Profi einen noch kürzeren Weg zum Paareplatztausch: *RLRLLLRRL*.

Während einige andere Leute die richtig schweren Sachen aus der Algebra-Vorlesung wie Sylow-Gruppen hervorkramen, wirft Wolfgang Thumser wie aus heiterem Himmel eine neue Tanzformation in die Diskussion. Diesmal sind es nur noch fünf Tänzer namens *a*, *b*, *c*, *d* und *e*; sie sind wieder in zwei Kreisen angeordnet; in beiden Kreisen darf eine »Vierteldrehung« namens *l* (im Uhrzeigersinn) beziehungsweise *r* (gegen den Uhrzeigersinn) stattfinden, sodass jeder Tänzer den Platz seines Kreisnachfolgers einnimmt (Bild S. 107 oben, rechts).

Offensichtlich hat Wolfgang Thumser die Lösung schon, schreibt sie aber nicht einfach auf, sondern lässt die anderen noch zappeln und suchen. Das tun die auch fleißig und finden rasch heraus, dass mit *l* und *r* jede Stellung der fünf Tänzer erreichbar ist. Die Bewegungen *l* und *r* erzeugen also die gesamte Permutationsgruppe S_5. Aber was haben sie mit *L* und *R* zu tun?

Überraschung: das Dodekaeder

Dafür bringt Wolfgang Thumser einen neuen Gegenstand ins Spiel, der eine besonders innige Beziehung zur Zahl 5 aufzuweisen hat: das Dodekaeder, jenen platonischen Körper, der aus zwölf regelmäßigen Fünfecken besteht. Das Dodekaeder ist auf sehr vielfältige Weise symmetrisch, und diese Eigenschaft wird – wen wundert's – durch eine Gruppe ausgedrückt: die Symmetriegruppe des Dodekaeders. Sie enthält alle Drehungen und Spiegelungen, die das Dodekaeder wieder auf sich selbst abbilden. Ein Beispiel ist eine Fünfteldrehung um die Achse, die durch die Mittelpunkte zweier gegenüberliegender Dodekaederflächen geht. Insgesamt hat diese Gruppe 120 Elemente – aber sie ist nicht die S_5! Das wäre dann doch zu einfach.

Immerhin: In dem genannten Beispiel werden die beiden Flächen, durch deren Mittelpunkt die Achse verläuft, auf sich selbst abgebildet, während deren jeweilige fünf Nachbarflächen einen Platz im Fünferkreis weiterrücken. Das entspricht genau der Bewegung *LR* von Herrn Vier (unbewegt) und seinen Mittänzern (im Kreis wandernd). Man identifiziere also jeden Tänzer mit einer Fläche des Dodekaeders plus der gegenüberliegenden Fläche und nummeriere entsprechend die Flächen des Dodekaeders von 1 bis 6; gegenüberliegende Flächen bekommen gleiche Nummern.

Entspricht jetzt jede Bewegung der sechs Tänzer einer Symmetrieabbildung des Dodekaeders? Nein, das wäre immer noch zu einfach. Aber Wolfgang Thumser hilft uns wieder auf die Sprünge: Im Dodekaeder steckt ein Würfel. Man zeichne in jede fünfeckige Seitenfläche

eine Diagonale, und zwar so, dass sich jeweils drei solcher Diagonalen an den Ecken treffen und aufeinander senkrecht stehen (Bild S. 107 unten). Das ergibt die zwölf Kanten eines Würfels!

Man bezeichne nun jede Würfelfläche durch die Nummern der beiden Dodekaederflächen, die mit ihrem größten Teil über dieser Würfelfläche liegen. Im genannten Bild sind dem Betrachter die Würfelflächen (3, 4) (oben) und (1, 5) (vorn) zugewandt. Der Würfel mit seinen sechs Flächen ist somit durch drei Zahlenpaare charakterisiert, im abgebildeten Beispiel: (3, 4), (1, 5) und (2, 6). Jedes Zahlenpaar kommt doppelt vor, auf der Vorder- wie auf der Rückseite.

Jetzt kommt der Knüller. Man wende auf diese Zahlen eine beliebige Permutation aus S_6 an, zum Beispiel die Abbildung L. Dadurch entsteht ein neuer Würfel, gekennzeichnet durch drei Zahlenpaare. Im Dodekaeder steckt nämlich nicht nur ein Würfel, sondern deren fünf. Der Körper, der aus diesen fünf einander durchdringenden Würfeln besteht, ist sehr ansehnlich (Bild links), und die Online-Artikel eines gewissen Christoph Pöppe über räumliche Geometrie im Allgemeinen und die Symmetriegruppe des Dodekaeders und den Würfelfünfling im Besonderen haben der Anschauung der Newsgroup-Mathematiker aufgeholfen (was den Autor natürlich freut).

Die Abbildungen der Sechser-Tanzgruppe wirbeln diese fünf Würfel durcheinander, sind also Permutationen von fünf Elementen. Und wenn man die fünf Würfel in der richtigen Weise mit a, b, c, d und e bezeichnet, entspricht die Abbildung L, angewandt auf die Zahlen 1 bis 6, genau der Abbildung l, angewandt auf die Würfel a bis e. Entsprechendes gilt für die Abbildungen R und r.

Damit ist unter Einsatz der verschiedensten Ideen und begrifflichen Hilfsmittel vollkommene Klarheit hergestellt: Die Gruppe der Bewegungen der Sechser-Tanzformation ist tatsächlich die S_5, und es gibt eine explizit angebbare Korrespondenz zwischen den Positionen der sechs Tänzer 1 bis 6, der fünf Tänzer a bis e und der Würfel im Dodekaeder.

Nur zwei Fragen sind noch offen: Was tun die Mitglieder der Newsgroup, nachdem das Problem gelöst ist? Das, was Mathematiker so gerne tun: verallgemeinern. Man untersucht mit wieder anderen Mitteln die Gruppenstruktur, wenn an dem Tanz nicht nur drei, sondern vier, fünf oder noch mehr Paare beteiligt sind.

Und wie endet die Geschichte mit Sabine? Tragikomisch. Wir freundeten uns an, und irgendwann erzählte ich ihr beiläufig, dass ich für ein halbes Jahr an der Kernforschungsanlage Jülich arbeitete. Diese Institution hat zwar der Kernenergie inzwischen weit gehend abgeschworen und ihren Namen in »Forschungszentrum Jülich« geändert; aber damals glaubte Sabine, ich sei der Atom-Mafia beigetreten, erklärte mich zu ihrem Feind und sprach nie wieder ein Wort mit mir. Wirklich schade. ◁

AUTOR



Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei http://www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

PREISRÄTSEL

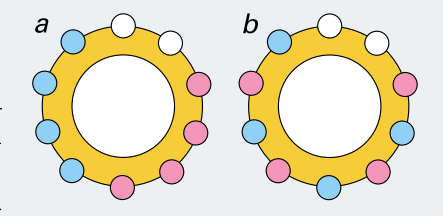
Am runden Tisch

Von Pierre Tougne

Ein Ehepaar, beide Mathematiker, hat vier Kolleginnen und vier Kollegen zum Abendessen in ein Restaurant eingeladen. Als das Paar dort ankommt, sitzen die Gäste bereits am bestellten runden Tisch und zwar streng nach Frauen und Männern getrennt. Zwei Plätze nebeneinander sind für die Gastgeber frei geblieben (Bild, *a*).

Die Gastgeberin bittet die Kolleginnen und Kollegen, sich doch in bunter Reihe, also Frau, Mann, Frau …, zu setzen. Zudem sollten am Ende wieder dieselben Plätze für die Gastgeber frei sein (*b*).

Um diese Sitzordnung zu erreichen, stehen immer wieder zwei Tischnachbarn gemeinsam auf und nehmen die beiden freien Plätze ein. Wer zuvor rechts von seinem Nachbarn gesessen hat, tut dies auch nachher.



Wie viele Bewegungen von Tischnachbarn sind mindestens nötig, bis die Gäste wie in der Abbildung rechts sitzen? Und wie viele Bewegungen wären es bei zweimal fünf Gästen?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Blechschilder »Kamel«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 11. Oktober 2005, eingehen.

Lösung zu »Rosenkavaliere« (August 2005)

Manchmal hat der Kavalier nur einen Weg, um eine bestimmte Anzahl Rosen zu bekommen; manchmal gibt es mehrere Wege, die in die Ehe führen. Für die Anzahl von 28 Rosen sind es immerhin 13.

- 7 Rosen: ADEH
- 14 Rosen: ABEH, AEIH
- 21 Rosen: ABFEDH
- 28 Rosen: ABCFIEH, ABCFJIH, ABCGFIEDH, ABCGJFEH, ABCGJFIH, ABCGJIEH, ABFCGJIH, ABFJIEH, ADEBFGJIH, AEBCFIH, AEBCGJIH, AEBFJIH und AEFCGJIH
- 35 Rosen: ABCGJIFEDH

Die Gewinner der fünf Sweatshirtjacken mit Spektrum-Logo sind Elisabeth Arnold, Essenbach; Gunnar Johannsen, Bonn; Helmut Schmitz, Pullach; Silvia Schickel, Erding; und Harald Krug, Linkenheim.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

eine Diagonale, und zwar so, dass sich jeweils drei solcher Diagonalen an den Ecken treffen und aufeinander senkrecht stehen (Bild S. 107 unten). Das ergibt die zwölf Kanten eines Würfels!

Man bezeichne nun jede Würfelfläche durch die Nummern der beiden Dodekaederflächen, die mit ihrem größten Teil über dieser Würfelfläche liegen. Im genannten Bild sind dem Betrachter die Würfelflächen (3, 4) (oben) und (1, 5) (vorn) zugewandt. Der Würfel mit seinen sechs Flächen ist somit durch drei Zahlenpaare charakterisiert, im abgebildeten Beispiel: (3, 4), (1, 5) und (2, 6). Jedes Zahlenpaar kommt doppelt vor, auf der Vorder- wie auf der Rückseite.

Jetzt kommt der Knüller. Man wende auf diese Zahlen eine beliebige Permutation aus S_6 an, zum Beispiel die Abbildung *L*. Dadurch entsteht ein neuer Würfel, gekennzeichnet durch drei Zahlenpaare. Im Dodekaeder steckt nämlich nicht nur ein Würfel, sondern deren fünf. Der Körper, der aus diesen fünf einander durchdringenden Würfeln besteht, ist sehr ansehnlich (Bild links), und die Online-Artikel eines gewissen Christoph Pöppe über räumliche Geometrie im Allgemeinen und die Symmetriegruppe des Dodekaeders und den Würfelfünfling im Besonderen haben der Anschauung der Newsgroup-Mathematiker aufgeholfen (was den Autor natürlich freut).

Die Abbildungen der Sechser-Tanzgruppe wirbeln diese fünf Würfel durcheinander, sind also Permutationen von fünf Elementen. Und wenn man die fünf Würfel in der richtigen Weise mit *a*, *b*, *c*, *d* und *e* bezeichnet, entspricht die Abbildung *L*, angewandt auf die Zahlen 1 bis 6, genau der Abbildung *l*, angewandt auf die Würfel *a* bis *e*. Entsprechendes gilt für die Abbildungen *R* und *r*.

Damit ist unter Einsatz der verschiedensten Ideen und begrifflichen Hilfsmittel vollkommene Klarheit hergestellt: Die Gruppe der Bewegungen der Sechser-Tanzformation ist tatsächlich die S_5, und es gibt eine explizit angebbare Korrespondenz zwischen den Positionen der sechs Tänzer 1 bis 6, der fünf Tänzer *a* bis *e* und der Würfel im Dodekaeder.

Nur zwei Fragen sind noch offen: Was tun die Mitglieder der Newsgroup, nachdem das Problem gelöst ist? Das, was Mathematiker so gerne tun: verallgemeinern. Man untersucht mit wieder anderen Mitteln die Gruppenstruktur, wenn an dem Tanz nicht nur drei, sondern vier, fünf oder noch mehr Paare beteiligt sind.

Und wie endet die Geschichte mit Sabine? Tragikomisch. Wir freundeten uns an, und irgendwann erzählte ich ihr beiläufig, dass ich für ein halbes Jahr an der Kernforschungsanlage Jülich arbeitete. Diese Institution hat zwar der Kernenergie inzwischen weit gehend abgeschworen und ihren Namen in »Forschungszentrum Jülich« geändert; aber damals glaubte Sabine, ich sei der Atom-Mafia beigetreten, erklärte mich zu ihrem Feind und sprach nie wieder ein Wort mit mir. Wirklich schade. ◁

AUTOR



Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei http://www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

PREISRÄTSEL

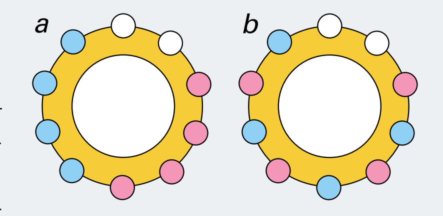
Am runden Tisch

Von Pierre Tougne

Ein Ehepaar, beide Mathematiker, hat vier Kolleginnen und vier Kollegen zum Abendessen in ein Restaurant eingeladen. Als das Paar dort ankommt, sitzen die Gäste bereits am bestellten runden Tisch und zwar streng nach Frauen und Männern getrennt. Zwei Plätze nebeneinander sind für die Gastgeber frei geblieben (Bild, *a*).

Die Gastgeberin bittet die Kolleginnen und Kollegen, sich doch in bunter Reihe, also Frau, Mann, Frau …, zu setzen. Zudem sollten am Ende wieder dieselben Plätze für die Gastgeber frei sein (*b*).

Um diese Sitzordnung zu erreichen, stehen immer wieder zwei Tischnachbarn gemeinsam auf und nehmen die beiden freien Plätze ein. Wer zuvor rechts von seinem Nachbarn gesessen hat, tut dies auch nachher.



Wie viele Bewegungen von Tischnachbarn sind mindestens nötig, bis die Gäste wie in der Abbildung rechts sitzen? Und wie viele Bewegungen wären es bei zweimal fünf Gästen?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Blechschilder »Kamel«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 11. Oktober 2005, eingehen.

Lösung zu »Rosenkavaliere« (August 2005)

Manchmal hat der Kavalier nur einen Weg, um eine bestimmte Anzahl Rosen zu bekommen; manchmal gibt es mehrere Wege, die in die Ehe führen. Für die Anzahl von 28 Rosen sind es immerhin 13.

- 7 Rosen: ADEH
- 14 Rosen: ABEH, AEIH
- 21 Rosen: ABFEDH
- 28 Rosen: ABCFIEH, ABCFJIH, ABCGFIEDH, ABCGJFEH, ABCGJFIH, ABCGJIEH, ABFCGJIH, ABFJIEH, ADEBFGJIH, AEBCFIH, AEBCGJIH, AEBFJIH und AEFCGJIH
- 35 Rosen: ABCGJIFEDH

Die Gewinner der fünf Sweatshirtjacken mit Spektrum-Logo sind Elisabeth Arnold, Essenbach; Gunnar Johannsen, Bonn; Helmut Schmitz, Pullach; Silvia Schickel, Erding; und Harald Krug, Linkenheim.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Intelligent Design

Wo bleibt die Wissenschaft?

Der amerikanische Philosoph Daniel C. Dennett kritisiert den anhaltenden Versuch der religiösen Rechten der USA, Kreationismus als Wissenschaft zu verkaufen.

Von Daniel C. Dennett

Präsident Bush plädierte im August dafür, dass in US-Schulen das Konzept des »Intelligenten Designs« gelehrt werde. »Ich denke, ein Teil der Erziehung besteht darin, Menschen mit unterschiedlichen Denkschulen vertraut zu machen«, hatte Bush bereits zuvor erklärt. Einige Wochen später schlug Bill Frist, Senator aus Tennessee und Führer der Republikaner, in dieselbe Kerbe: Würden Intelligentes Design und die Evolutionstheorie gleichzeitig gelehrt, »zwänge man niemandem eine der beiden Theorien auf. Ich denke, in einer pluralistischen Gesellschaft ist dies der fairste Weg, Erziehung zu handhaben und die Menschen auf die Zukunft vorzubereiten«.

Aber ist Intelligentes Design wirklich eine anerkannte Wissenschaft? Hat das Konzept wahrhaft einen Wert oder sind diese Menschen einem der raffiniertesten Schwindel in der Geschichte der Wissenschaft aufgesessen? Wäre solch ein Schwindel nicht unmöglich? Nein. Er funktioniert wie folgt:

Stellen Sie sich vor, wie leicht es für eine entschlossene Gruppe von Neinsagern wäre, das Vertrauen der Welt in die Quantenphysik – eine äußerst seltsame Wissenschaft – oder in Einsteins Relativitätstheorie zu erschüttern. Obwohl Physiker diese Erkenntnisse seit einem Jahrhundert lehren und verbreiten, gelingt es nur wenigen, diese Konzepte grundlegend zu verstehen.

Viele Leute suchen nach Rechtfertigungen, die ihnen helfen sollen, diese Lehren zu akzeptieren: »Gut, die Experten stimmen in ihren Ansichten im Wesentlichen überein, und sie erheben den Anspruch, dass ihr Verständnis dieser merkwürdigen Ideen dazu geführt hat, dass wir die Atomenergie beherrschen sowie Transistoren und Laser herstellen, die zweifellos funktionieren.«

Physiker haben das Glück, dass solche Unheilsstifter keine große Motivation verspüren, gegen sie zu Felde zu ziehen. Denn die Wissenschaftler bräuchten nicht lange, um auch sie davon zu überzeugen, dass Quantenphysik und Einsteins Relativitätstheorie über jeden Zweifel erhaben sind.

Niemand ist gegen Wunschdenken gefeit

Bei der Evolution sieht es jedoch anders aus. Die grundlegenden wissenschaftlichen Vorstellungen der Evolution durch natürliche Auslese sind nicht nur verblüffend. Natürliche Auslese – welche die traditionell Gott zugeschriebene Rolle übernimmt, kleine und große Wesen zu entwerfen und zu »designen« – scheint zugleich eines der besten Argumente für unseren Glauben an Gott zu widerlegen. Es gibt daher eine hohe Motivation, den Lehren der Biologen zu widersprechen. Niemand ist gegen Wunschdenken gefeit. Es bedarf wissenschaftlicher Disziplin, um uns vor unserer eigenen Leichtgläubigkeit zu schützen. Wir haben aber raffinierte Wege gefunden, um uns selbst und andere an der Nase herumzuführen. Einige der Methoden lassen sich einfach analysieren, andere bedürfen näherer Betrachtung.

Vor einigen Jahren erhielt ich eine Kreationistenbroschüre. Sie enthielt »Test 2«, eine amüsante, wie ein simpler Fragebogen aufgemachte Seite (siehe links außen).

Das sitzt, ihr Darwinisten! Die vermutete Verlegenheit, in die eine Testperson bei Nennung dieser Gründe gerät, appelliert genau an die Ungläubigkeit, mit der viele Leute Dar-

Test 2

▶ Kennen Sie ein Gebäude, das keinen Erbauer hat?
(Ja) (Nein)

▶ Kennen Sie ein Gemälde, das keinen Maler hat?
(Ja) (Nein)

▶ Kennen Sie ein Auto, das keinen Hersteller hat?
(Ja) (Nein)

Wenn Sie eine der obigen Fragen mit Ja beantwortet haben, nennen Sie die Gründe.

wins großen Ideen begegnen. Es scheint doch offensichtlich – oder etwa nicht? –, dass es keine Designs ohne Designer und keine Schöpfungen ohne Schöpfer geben kann.

Nun ja, mag so sein – bis man einen Blick auf das wirft, was die heutige Biologe ohne jeden Zweifel nachgewiesen hat: Die natürliche Auslese ist ein Prozess, in dem sich reproduzierende (Lebe-)Wesen um begrenzte Ressourcen kämpfen – in einem Wettbewerb, der von blindem Versuch und Irrtum geprägt ist und dadurch automatisch Verbesserungen hervorbringt. Und dieser Prozess kann atemberaubend raffinierte Designs erzeugen.

Nehmen wir die Entwicklung des Auges – gegen die Kreationisten besonders gern zu Felde ziehen. Wie um alles in der Welt, so fragen sie, kann solch ein hochtechnisches Juwel durch eine bloße Serie kleiner, ungeplanter Schritte geschaffen worden sein? Nur ein intelligenter Designer konnte eine solch brillante Kombination aus formvariabler Linse, zu »Blendeneinstellung« fähiger Iris und extrem lichtempfindlicher Oberfläche ersinnen – dazu noch untergebracht in einer Kugel, die ihre Blickrichtung in einer hundertstel Sekunde zu verändern und jede Sekunde Megabytes an Informationen an den visuellen Kortex im Gehirn zu schicken vermag.

Doch wir lernen und verstehen immer besser, wie sich die Gene entwickelten und wie sie funktionieren – bis hin zu den Vorläufergenen in nicht sehfähigen Bakterien, aus denen sich vor mehr als 500 Millionen Jahren vielzellige Tiere entwickelt haben. Deshalb können wir die Geschichte erzählen, wie sich fotosensitive Punkte allmählich in lichtempfindliche Krater verwandelten, die näherungsweise die Richtung ermitteln können, aus der das Licht kommt, und wie sich vor den Kratern langsam Linsen bildeten, welche die Fähigkeit zur Aufnahme von Information noch weiter verbesserten.

Bei Erfolg die Messlatte höher gelegt

Wir können nicht alle Details dieses Prozesses rekonstruieren, doch es gibt noch heute überall im Tierreich viele Arten von Augen, die diese Zwischenstadien repräsentieren. Außerdem haben wir detaillierte Computermodelle, die bestätigen, dass dieser schöpferische Prozess so abläuft, wie die Theorie ihn vorhersagt.

Man benötigt dazu nur die seltenen genetischen »Unfälle«: Ein Tier weist eine neue Mutation auf, die es besser sehen lässt als seine Rivalen. Wenn dies ihm dazu verhilft, mehr Nachkommen zu haben, erhält die Evolution dadurch die Chance, die Messlatte ein wenig höher zu legen: Das Design des Auges verbessert sich mit dieser zufälligen Mutation. Und da sich diese Verbesserungen auf gut Glück mit der Zeit häufen – wie Darwin richtig beobachtete –, können auch Augen mit der Zeit immer besser werden, ohne dass es dazu eines intelligenten Designers bedarf.

So genial das Design des Auges erscheinen mag, es verrät seinen Ursprung mit einem bemerkenswerten Konstruktionsfehler: Die Netzhaut ist gleichsam umgekrempelt, ihr Inneres zeigt nach außen. Die Nervenfasern, welche die Signale von den Zapfen und Stäbchen des Auges (die Licht und Farben sehen) weiterleiten, verlaufen oberhalb von diesen – und müssen durch ein Loch in der Netzhaut nach hinten geführt werden, um zum Gehirn zu gelangen. Auf diese Weise entsteht der blinde Fleck. Kein intelligenter Designer würde solch plumpes Flickwerk etwa in einen Camcorder packen. Und dies ist nur einer von Hunderten an »Unfällen«, die – unwiderruflich eingebettet in die evolutionäre Geschichte – die Planlosigkeit dieses historischen Prozesses bestätigen.

Wenn Sie Test 2 überzeugend fanden – eine Art kognitive Illusion, die man selbst dann verspürt, wenn man sie nur teilweise für richtig hält –, dann geht es Ihnen wie so ziemlich jedem anderen auf der Welt. Die Vorstellung, dass natürliche Auslese die Fähigkeit hat, solche hoch entwickelten Designs hervorzubringen, ist stark kontraintuitiv. Francis Crick, einer der Entdecker der DNA, hat einmal scherzhaft seinem Kollegen Leslie Orgel »Orgels zweite Regel« zugeschrieben: Evolution ist klüger als man selbst. Evolutionsbiologen sind oft überrascht von der Fähigkeit der natürlichen Selektion, eine geniale Lösung für ein im Labor aufgeworfenes Designproblem zu entdecken.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Bezweifelt die Evolutionslehre: Kardinal Schönborn. Für den Wiener Erzbischof folgt die Evolution einer »internen Finalität«.

Kein Intelligenter Designer würde so plumpes Flickwerk wie den blinden Fleck in die Netzhaut packen

Mit diesen Erkenntnissen können wir uns etwas anspruchsvolleren Aspekten der kognitiven Illusion aus Test 2 zuwenden. Wenn Evolutionisten wie Crick die Klugheit des Prozesses der natürlichen Auslese bewundern, heißt das nicht, dass sie das Konzept des Intelligenten Designs befürworten. Die in der Natur vorgefundenen Designs sind nichts anderes als brillant. Doch der Prozess, der diese Designs hervorbringt, ist bar jeglicher ihm innewohnender Intelligenz.

Die Befürworter des Intelligenten Designs indes nutzen die Zweideutigkeit zwischen ▷

dem Prozess und dem Produkt aus, die dem Wort Design anhaftet. Für sie ist die Präsenz eines fertigen Produkts (etwa ein voll entwickeltes Auge) der Beweis dafür, dass es einen intelligenten Designprozess gab. Doch dieser verlockende Schluss ist, wie Evolutionsbiologen fanden, ein Irrtum.

Ja, die Augen sind zum Sehen da, aber diese Zweckbestimmung und alle anderen in der natürlichen Umwelt können durch Prozesse erzeugt werden, die selbst zwecklos und ohne Intelligenz sind. Dies ist schwer zu verstehen – aber nicht schwerer als etwa die Vorstellung, dass farbige Objekte in unserer Welt aus kleinen Atomen bestehen, die selbst nicht farbig sind, oder dass Hitze nicht aus kleinen heißen Dingen besteht.

Es gibt seitens des »Intelligent Designs« keine Ergebnisse, die die vorherrschende biologische Lehrmeinung anfechten

Die starke Fokussierung auf Intelligentes Design hat paradoxerweise etwas anderes in den Hintergrund rücken lassen – die vielen wirklich wissenschaftlichen Kontroversen zum Thema Evolution. In fast jedem Forschungsgebiet wird die eine oder andere etablierte Theorie zuweilen in Frage gestellt. Eine legitime Methode, solche Streits vom Zaun zu brechen, besteht darin, eine alternative Theorie aufzustellen, die eine von der herkömmlichen Theorie brüsk abgelehnte Vorhersage trifft, sich dann aber als zutreffend erweist; oder etwas erklärt, das Vertreter des Status quo bislang rätselhaft erschien; oder zwei separate Theorien vereint – um den Preis, dass einige Elemente der bisherigen Sichtweise aufgegeben werden müssen.

Doch bis heute haben die Verfechter des Intelligenten Designs mit nichts dergleichen aufwarten können. Es gibt keine Ergebnisse, die die vorherrschende biologische Lehrmeinung anfechten. Es gibt keine Fossilienfunde, Genomanalysen, biogeografischen Daten oder vergleichende Anatomiebefunde, die das überkommene Verständnis der Evolution in Frage stellen.

Stattdessen benutzen die Vertreter des Intelligenten Designs einen Trick, der etwa so funktioniert: Zunächst missbrauchen oder fehlinterpretieren sie die Arbeit eines Wissenschaftlers. Dann erhalten sie von diesem eine von Verärgerung zeugende Widerlegung. Und dann zitieren sie die Widerlegung, statt sich geradeheraus mit den monierten Punkten zu befassen – als Nachweis dafür, dass eine Kontroverse vorliegt, die es wert sei, gelehrt zu werden.


LASZLO BENCZE, MIT FRDL. GEN. VON WILLIAM A. DEMBSKI

Intelligent-Design-Verfechter William Dembski hält Widerlegungen des ID für Haarspalterei.

Beachten Sie, dass dieser Trick nicht an Inhalte gebunden ist. Er lässt sich auf jedes Thema anwenden. »Schmidts geologische Arbeiten stützen meine These, dass die Erde eine Scheibe ist«, könnte ein Kreationist behaupten – wobei er Schmidts Arbeit fehlinterpretiert. Wenn Schmidt sich dann über den Missbrauch seiner Arbeit beschwert, könnte der Kreationist etwa so antworten: »Sehen Sie, wie groß die Kontroverse ist? Zwischen Professor Schmidt und mir gibt es einen gigantischen Gelehrtenstreit. Wir sollten diese Kontroverse in den Schulklassen lehren.« Und jetzt kommt der Clou: Oft kann der Kreationist die technisch und fachsprachlich hochtrabende Debatte zu seinem eigenen Vorteil ausschlachten – indem er darauf baut, dass die Mehrheit von uns bei all den schwierigen Details die entscheidenden Punkte gar nicht mitbekommt.

William Dembski, Mathematiker, Philosoph, Theologe und einer der lautstärksten Verfechter des Intelligenten Designs, provozierte den Biologen Thomas D. Schneider zu einer Antwort, die Dembski als »eine Art Haarspalterei, die außen stehenden Beobachter nur als lächerlich erscheinen kann« charakterisiert. Was Wissenschaftler – zu Recht – als vernichtende Widerlegung aus der Feder von Schneider betrachten, wird Laien als lächerliche Haarspalterei verkauft.

Bisher kein Erkärungsversuch

Kurz gesagt: keine Wissenschaft. Tatsächlich gibt es bislang nicht eine Intelligente-Design-Hypothese, die als alternative Erklärung eines biologischen Phänomens präsentiert wurde. Dies mag Leute überraschen, die glauben, dass die Thesen des Intelligenten Designs in direktem Widerstreit zu denen den Nicht-Intelligenten-Designs durch natürliche Selektion stehen. Doch einfach nur zu proklamieren »Ihr habt noch nicht alles erklärt«, wie es Vertreter des Intelligenten Designs tun, stellt noch keine alternative Hypothese auf. Sicherlich konnte die Evolutionsbiologie noch nicht alles aufklären, was Biologen Rätseln aufgibt. Aber Intelligentes Design hat noch nicht einmal versucht, irgendetwas zu erklären.

Um eine alternative Hypothese aufstellen zu können, muss man tief in die Forschung einsteigen und Details liefern, die überprüfbare Konsequenzen haben. Bislang haben sich die Vertreter des Intelligenten Designs bequem um diese Notwendigkeit herumgedrückt – wobei sie behaupten, sie hätten keine spezifischen Vorstellungen, wer oder was dieser Intelligente Designer sein könnte.

Lassen Sie uns, um diese Unzulänglichkeit zu verdeutlichen, eine imaginäre Hypothese des Intelligenten Designs betrachten, welche

die Entstehung der Menschen auf unserem Planeten erklären könnte:

Vor sechs Millionen Jahren kamen intelligente Genforscher von einer anderen Galaxie zur Erde. Sie befanden, dass dieser Planet interessanter wäre, wenn es hier eine sprechende Spezies gäbe. Also wählten sie einige Primaten aus, veränderten deren Gene, um ihnen den Sprachinstinkt zu geben, und vergrößerten deren Stirnlappen, um Planen und Denken zu ermöglichen. Es klappte.

Abwesenheit von Argumenten

Wenn diese Hypothese in irgendeiner Form zuträfe, könnte sie erklären, wie und warum Menschen sich von ihren nächsten Verwandten unterscheiden – und würde zugleich die derzeit dominierenden Evolutionshypothesen in die Schranken verweisen.

Wir hätten immer noch das Problem zu klären, wie denn diese intelligenten Genforscher auf ihrem Heimatplanet entstanden sind. Doch diese zusätzliche Komplikation können wir getrost ignorieren, da es auch sonst nicht die entferntesten Hinweise gibt, die diese Hypothese untermauern.

Ich möchte an dieser Stelle etwas anmerken, über das die Intelligente-Design-Gemeinde nicht gern diskutiert: Es gibt keine andere Intelligente-Design-Hypothese, die mehr Substanz hätte. Tatsächlich hat meine weit hergeholte These den Vorteil, dass sie sich im Prinzip testen lässt. Wir könnten das Genom des Menschen und des Schimpansen miteinander vergleichen und nach eindeutigen Spuren gentechnischer Manipulation seitens dieser außergalaktischen Genforscher suchen. Intelligente-Design-Forscher könnten sich eines Nobelpreises sicher sein, wenn es ihnen gelänge, in der vermeintlich funktionslosen »Junk-DNA«, die den größten Teil des menschlichen Genoms ausmacht, eine Art Gebrauchsanweisung für diese Manipulation zu finden. Doch wenn sie überhaupt schon in dieser Richtung tätig gewesen sein sollten, haben sie bislang noch keinen Forschungsbericht veröffentlicht.

Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass es in der Biologie viele inhaltlich seriöse wissenschaftliche Kontroversen gibt, die noch nicht in die Schulbücher eingeflossen sind. Die an den Debatten teilnehmenden Forscher wetteifern mit ihren Fachkollegen um Akzeptanz ihrer Thesen – in von anderen Experten begutachteten Fachzeitschriften. Und den Schulbehörden obliegt es zu entscheiden, welche neuen Erkenntnisse ein so hohes Akzeptanzniveau – wenn nicht gar allgemeine Anerkennung – gefunden haben, dass sie nun auch von Schülern und Studenten gelernt werden sollten.

Bringt also Argumente, Intelligente Designer! Liefert Belege für die Hypothese, dass das Leben auf dem Mars begann und durch kosmischen Einschlag auf die Erde gelangte. Liefert Belege für die Wasser-Affen-Theorie, für die Hypothese des gestischen Ursprungs der Sprache und für die Behauptung, dass Singen dem Sprechen vorausging – um nur einige wenige der gewagten Hypothesen zu erwähnen, die aktiv verfochten, aber nur unzureichend durch harte Fakten belegt werden.

Das Discovery-Institut – jene konservative Institution, die half, dem Konzept des Intelligenten Designs Geltung zu verschaffen – beschwert sich darüber, dass seine Mitglieder in etablierten Wissenschaftsjournalen angefeindet werden. Doch diese Anfeindungen durch anerkannte Forscher sind nicht die wahren Hindernisse, die dem Intelligenten Design im Weg stehen.

Wäre Intelligentes Design ein wissenschaftliches Konzept, dessen Zeit gekommen ist, würden junge Wissenschaftler hyperaktiv durch ihre Labors eilen und um die Nobelpreise wetteifern, die sicherlich jedem winken, der eine der Säulen der herkömmlichen Evolutionsbiologie umstoßen könnte.


THOMAS D. SCHNEIDER

Der US-Biologe Thomas D. Schneider widerlegt Intelligent Design und wird dafür lächerlich gemacht.

Nobelpreise winken jedem, der eine der Säulen der herkömmlichen Evolutionstheorie umstoßen könnte

Erinnern Sie sich an die Kalte Fusion? Das wissenschaftliche Establishment stand dieser Hypothese total ablehnend gegenüber. Dennoch gingen überall auf der Welt Wissenschaftler in ihre Labors, um diese Idee zu erforschen – in der Hoffnung, Anteil an dem Ruhm zu erlangen, falls sie sich als zutreffend erweisen sollte.

Statt jedes Jahr mehr als eine Million Dollar für die Veröffentlichung von Büchern und Artikeln für Nichtwissenschaftler und andere PR-Kampagnen auszugeben, sollte das Discovery-Institut lieber ein eigenes, von Experten gegengelesenes elektronisches Fachjournal herausgeben. Damit könnte es besser seinem erklärten Anspruch gerecht werden, es sei der mannhafte Verteidiger mutiger, gegen die herrschende Lehrmeinung antretender Bilderstürmer.

Bislang freilich ist die Theorie, für die sich ihre Vertreter stark machen, genauso, wie George Gilder, ein langjähriges Mitglied des Discovery-Instituts, sie beschreibt: »Intelligentes Design hat selbst keinen Inhalt.«

Ohne Inhalt aber kann es auch keine »Kontroverse« geben, die sich im Biologieunterricht zu lehren lohnte. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Daniel C. Dennett ist Philosophieprofessor an der Tufts University in Medford, US-Staat Massachusetts, und Autor der Bücher »Darwins gefährliches Erbe«, »Spielarten des Geistes« und »Philosophie des menschlichen Geistes«.

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

NASA

SERIE: DIE WELT IM JAHR 2050 Teil II

Menschheit am Scheideweg

Die Ärmsten der Armen aus ihrem Elend herauszuholen ist nicht nur eine Frage der Menschlichkeit. Werden etwa Kleinbauern der Dritten Welt in die Lage versetzt, sich und sogar andere zu ernähren, dient dies auch dem Erhalt der Natur

MINDEN PICTURES, TUI DE ROY

Biovielfalt

Umsichtig geplant, wäre die Rettung möglichst vieler Arten erschwinglich

MAGNUM PHOTOS, IAN BERRY

Armut

Ein Sechstel der Menschheit leidet große Not und braucht Hilfe

KENN BROWN & INTERNATIONAL DEVELOPMENT ENTERPRISES

Wasser und Landwirtschaft

Wie auch mit Low-Tech viel zu bewirken ist

WEITERE THEMEN IM NOVEMBER

Glaube und Wissen

Streitgespräch mit dem EKD-Vorsitzenden Bischof Huber über das Verhältnis von Religion, Hirnforschung und Fundamentalismus

Krieg in der Wüste

Den Orient zu erobern fiel Rom leicht. Doch mancher Kaiser scheiterte daran, die östlichen Provinzen gegen den Ansturm persischer Reiterheere zu schützen

Das Erdbeben von Lissabon

Ein schwerer Erdstoß und ein verheerender Tsunami forderten vor 250 Jahren über 60 000 Todesopfer und erschütterten das theologische Weltbild

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Das alternative Genom

Wie konnte der Mensch mit seiner geradezu dürftigen Genausstattung zu dem werden, was er ist? Zumal er etwa einer Maus genetisch zu fast 90 Prozent ähnelt



BILL STEELE